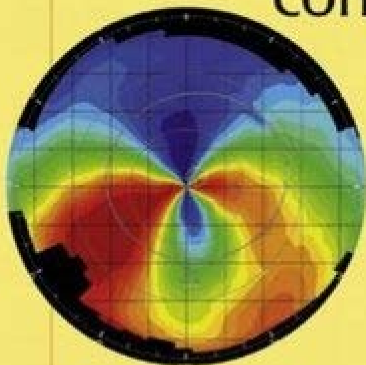
ELSEVIER MASSON

ATLAS EN OPHTALMOLOGIE

Damien Gatinel

# Topographie cornéenne



Préface de Joseph Colin

# Topographie cornéenne

ATLAS
EN OPHTALMOLOGIE

Directeur de Collection :
Pr Gilles Chaine, Hôpital Avicenne, Bobigny

*Dans la même collection*

**Rétinopathie diabétique**
par P. Massin, A. Erginay. 2010, 160 pages.

**Uvéite**
par B. Bodaghi, P. LeHoang. 2009, 416 pages.

**Dégénérescence maculaire liée à l'âge, 2e édition,**
par T. Desmettre, S.Y. Cohen. 2009, 244 pages.

**Strabologie : approches diagnostique et thérapeutique, 2e édition,**
par Marie-Andrée Espinasse-Berrod. 2008, 392 pages.

**La Réfraction de l'œil : du diagnostic à l'équipement optique,**
par A. Roth, A. Gomez, A. Péchereau. 2007, 416 pages.

**OCT de la macula, tomographie en cohérence optique,**
par A. Gaudric, B. Haouchine. 2007, 360 pages.

**Les Pathologies du fond de l'œil,**
par J.J. Kanski, S.A. Milewski, B.E. Damato, V. Tanner. Coordination scientifique de l'édition française de J. Bernard. 2006, 400 pages.

**La Papille optique**,
par A. Bron, J.-F. Rouland. 2006, 304 pages.

**Atlas d'ophtalmologie clinique, 3e édition**,
par D.J. Spalton, R.A. Hitchings, P.A. Hunter. Coordination de l'édition française de G. Chaine. Traduit de l'anglais par O. Abitbol, N. Alfonsi, G. Ducos, M.-H. Errera, L. Gheck, F. Mann, I. de Monchy, C. Rohart, B. Sonigo. 2005, 736 pages.

**Glaucome**
par C. Schnyder, A. Mermoud. 2005, 464 pages.

**Diagnostic angiographique des maladies rétiniennes,**
par S.Y. Cohen, G. Quentel. 2004, 2e édition, 350 pages.

**Les Greffes en ophtalmologie,**
par V. Borderie. 2004, 310 pages.

**Chirurgie des voies lacrymales,**
par J. Olver. Traduit de l'anglais par D. Schapiro. 2003, 172 pages.

**Le Lasik : de la théorie à la pratique,**
par D. Gatinel, T. Hoang-Xuan. 2003, 416 pages.

**Neuro-ophtalmologie**,
par C. Vignal, D. Miléa. 2002, 360 pages.

**Angiographie infrarouge au vert d'indocyanine,**
par S.Y. Cohen, G. Quentel, I. Meunier. 2001, 250 pages.

**La Cornée**
par G. Renard, P. Dighiero, P. Ellies, T. Than Trong. 2001, 236 pages. Directeur de collection : Pr Gilles Chaine, Hôpital Avicenne, Bobigny.

# Topographie cornéenne

Damien Gatinel

Praticien hospitalier, chef du service de chirurgie réfractive, de la cataracte
et du segment antérieur à la Fondation Rothschild, Paris




ELSEVIER
MASSON





ISBN : 978-2-294-71134-3

---

Elsevier Masson SAS, 62, rue Camille-Desmoulins, 92442 Issy-les-Moulineaux cedex
www.elsevier-masson.fr

*À ma petite Apolline*

# Préface

Pendant très longtemps, l'exploration de la puissance et de la topographie cornéennes s'est limitée la mesure de la kératométrie centrale et à l'évaluation subjective de sa forme par réflexion du disque de Placido. Son intérêt s'est rapidement accru dans les années 80 par le développement de la chirurgie réfractive cornéenne qui commençait à inciser puis remodeler la cornée pour en modifier la puissance réfractive, et l'essor de la technologie vidéo-informatique qui permettait d'abord très laborieusement puis de façon très sophistiquée d'étudier la forme de la cornée et d'en reconstituer les différentes caractéristiques.

Cette nouvelle exploration a vite démontré son intérêt dans différents domaines de la pratique ophtalmologique quotidienne (adaptation des lentilles de contact, gestion des astigmatismes postopératoires, dépistage et surveillance des kératocônes…), pour devenir aujourd'hui obligatoire dans tout bilan de chirurgie réfractive à la recherche, entre autres, de signes topographiques d'asymétrie cornéenne pouvant faire suspecter une forme fruste de kératocône.

L'absence d'ouvrage synthétique en langue française sur cette technologie était déplorée quotidiennement, et le besoin d'y pallier fortement réclamé, en particulier par nos étudiants.

Qui mieux que Damien Gatinel pouvait s'atteler à cette tache de réaliser un ouvrage d'actualité sur cette thématique, lui qui depuis de nombreuses années, avec ses collaborateurs, a su développer une très forte activité de recherche clinique et expérimentale dans ce domaine, au sein du CEROC, le Centre d'expertise et de recherche en optique clinique ?

Son travail a permis d'aboutir à cet ouvrage complet, pratique, très illustré, utile, que vous aurez, j'en suis certain, un énorme plaisir à lire et à utiliser pour votre pratique clinique. Ce livre, n'en doutons pas, constituera un ouvrage de référence indispensable pour tous les ophtalmologistes.

Qu'il me soit permis ici de le féliciter pour ce travail et de le remercier pour l'avoir si superbement réalisé, et pour sa fidèle amitié.

**Joseph Colin**

# Introduction

La mesure du relief, de la courbure, et de l'épaisseur de la cornée sont des étapes cruciales dans le diagnostic des maladies cornéennes et la mise au point de méthodes de correction de la vision. La topographie cornéenne correspond à la représentation graphique de certaines propriétés géométriques de la surface cornéenne. Topographie est un terme de Géographie qui vient du grec « topos » (le lieu) et « graphein » (décrire). La cornée est un organe unique dont la fonction dépend étroitement de la forme ; une variation de l'ordre du micron peut modifier ses propriétés optiques de manière significative.

La plupart des centres ou cabinets d'ophtalmologie sont équipés d'un auto-kératomètre afin d'estimer la courbure centrale de la surface antérieure de la cornée pour l'adaptation de lentilles de contact ou le calcul de la puissance de la lentille intraoculaire avant une chirurgie de la cataracte. Dans le cadre de l'évaluation des patients en vue d'une chirurgie réfractive, la simple mesure kératométrique ne suffit plus car elle ne produit que des mesures locales circonscrites à une zone annulaire localisée à 1.5 à 2 mm du sommet de la cornée. La sophistication croissante des méthodes de chirurgie réfractive rend nécessaire une analyse précise de l'intégralité de la surface cornéenne antérieure, voire l'accès à des données provenant directement de la face postérieure de la cornée. Disposer de l'ensemble des données antérieures et postérieures permet de calculer un paramètre important : l'épaisseur cornéenne en chaque point mesuré (tomographie cornéenne). Au cours des 20 dernières années, le développement rapide de la topographie cornéenne s'est fait parallèlement à celui de la chirurgie réfractive au laser excimer, et les progrès de la micro-informatique ont contribué la faire de la représentation par carte topographique de la puissance et de la forme de la cornée un examen accessible en pratique clinique.

Les instruments qui mesurent et décrivent les propriétés topographiques de la surface cornéenne peuvent être classés en deux grands types : les analyseurs du reflet d'un disque de Placido (mires concentriques réflectives) et des enregistreurs de l'élévation (essentiellement par balayage d'une fente lumineuse ou caméra rotative Scheimpflug). Les systèmes topographiques de courbure utilisant le disque de Placido sont des outils précieux dans l'évaluation de la courbure et de la réfraction cornéenne, mais ils n'étudient pas directement la forme spatiale réelle de la cornée. Les topographes d'élévation fournissent une estimation directe de l'élévation de la cornée, établissant ainsi une carte en trois dimensions du relief des surfaces cornéennes antérieures et postérieure. À partir de ces éléments, il est aisé de calculer l'épaisseur cornéenne en différents points. La combinaison des données de topographies de courbure et d'élévation recèle un fort potentiel pour la détection des anomalies cornéennes, l'adaptation des lentilles de contact et la planification de la chirurgie réfractive.

Aucun ouvrage ne peut répertorier la totalité des affections susceptibles de provoquer des modifications topographiques de la cornée ; les techniques d'investigation et de chirurgie cornéenne évoluent sans cesse, élargissant l'éventail des indications à la topographie cornéenne. Mon ambition était d'organiser, hiérarchiser et synthétiser les informations inhérentes à ma compréhension de l'examen topographique. C'est pourquoi cet ouvrage est construit à partir d'un plan d'analyse sémiologique faisant intervenir des propriétés géométriques comme l'asphéricité, la toricité, l'asymétrie et l'irrégularité. Leur expression topographique est caractéristique, et ils fournissent une grille de lecture permettant d'interpréter la diversité des « compositions topographiques » que la combinaison de ces « traits élémentaires » engendre.

Au fil des pages, le lecteur croisera la plupart des tableaux topographiques que l'on rencontre dans les situations cliniques les plus courantes. Les notions relatives au dépistage du kératocône infraclinique et à la mesure de la puissance optique cornéenne ont été particulièrement développées, car la prévention de l'ectasie iatrogène en chirurgie réfractive et le calcul de la puissance de l'implant de cristallin artificiel après chirurgie réfractive sont deux situations où la juste interprétation de l'examen topographique revêt une importance critique. Dans cet ouvrage, le recours aux équations mathématique est minimal, mais un recours important a été accordé aux illustrations et schémas explicatifs, afin de favoriser une compréhension plus intuitive qu'analytique. Certaines notions plus fondamentales sont toutefois rassemblées dans deux appendices.

Ce livre est le fruit d'interactions fécondes dont j'ai pu bénéficier au cours de ces dix dernières années. Je remercie tous ceux qui m'ont fait confiance, et n'ont jamais trahi la mienne. Je tiens particulièrement à remercier le Dr Alain Saad pour son apport efficace et précieux dans le domaine de la « traque topographique » des kératocônes frustres et autres cornées à risque d'ectasie. Ma reconnaissance va également aux partenaires industriels qui m'ont fait bénéficier d'un important soutien logistique à la Fondation Rothschild. Le contenu pédagogique de cet ouvrage doit beaucoup aux missions et formations dédiées à l'interprétation de la topographie cornéenne que je me suis vu confier en France et à l'étranger au fil des années.

Je remercie le Pr Gilles Chaine pour avoir accepté d'accueillir cet ouvrage dans la collection qu'il dirige, et le Pr Joseph Colin d'en avoir rédigé la préface.

L'écriture d'un livre est un long processus, source de plaisir créatif mais aussi de frustration, car le temps que l'on y consacre empiète trop souvent sur la vie sociale et familiale ; je remercie mes proches de leur patience et compréhension, et leur dédie cet ouvrage.

**Damien Gatinel**

Chapitre 1

# Quelques définitions utiles pour aborder l'étude de la topographie cornéenne

*Surface cornéenne*

*Méridien cornéen*

*Centre géométrique de la cornée*

*Centre de visée cornéen* (corneal sighting center)

*Vertex cornéen*

*Apex cornéen*

*Modèles géométriques de surface cornéenne*

*Symétrie et asymétrie – Énantiomorphisme*

*Zones cornéennes*

*Courbure apicale*

Ce chapitre introduit quelques définitions et concepts utiles pour mieux appréhender la terminologie utilisée en topographie cornéenne. Le lecteur est invité à s'y référer au besoin. Ces notions seront reprises et développées au travers des chapitres suivants.

## Surface cornéenne

La cornée comporte deux surfaces, l'une antérieure, l'autre postérieure. Ces surfaces sont circonscrites par le périmètre naturel formé par le limbe cornéo-conjonctival. Elles délimitent un «volume» cornéen, dont la distribution est représentée sur les cartes pachymétriques.

La surface cornéenne antérieure est recouverte du film lacrymal, dont l'épaisseur (quelques microns) est négligeable vis-à-vis de celle de l'épithélium cornéen dont elle épouse la surface. Ce film permet à la lumière d'être réfléchie de manière spéculaire, du moins en l'absence de sécheresse oculaire sévère. La réflexion lumineuse naît en partie de la différence d'indice de réfraction entre les milieux; environ 5 % de la lumière incidente sur la cornée est réfléchie par le film lacrymal [1, 2]. La réflexion est dite «spéculaire» quand la direction des rayons réfléchis dépend de l'incidence des rayons incidents. Ces propriétés de réflexion lumineuse sont utilisées en topographie spéculaire. Une altération de la qualité du film lacrymal, ou l'interposition de cils peuvent réduire la qualité de l'image réfléchie et donc de l'examen topographique.

La surface postérieure est tapissée par l'endothélio-descemet. Sa mesure n'est pas possible par réflexion spéculaire, car la différence d'indice entre le stroma cornéen et l'humeur aqueuse est trop faible; elle fait appel à des techniques de balayage par fente lumineuse, ou d'analyse Scheimpflug.

La courbure d'une surface lisse et continue peut être mesurée en tout point de celle-ci. La manière dont elle est mesurée définit le type de carte topographique spéculaire (axiale, tangentielle, moyenne).

## Méridien cornéen

Un méridien est défini comme une ligne joignant les points alignés de part et d'autre du vertex cornéen (ex : 0-180° pour le méridien horizontal, 90–270° pour le méridien vertical). Les méridiens se distribuent sur 360° et sont repérés par un axe variant entre 0 et 180°. Comme leur nom le suggère, les hémiméridiens sont définis comme une moitié de méridien, et sont repérés par un axe variant entre 0 et 360° (Fig. 1.1). Les cartes topographiques sont généralement munies d'un repère azimutal gradué en degrés qui permet de repérer de manière précise l'orientation (axe) des méridiens remarquables. La courbure tangentielle explore la courbure le long des méridiens cornéens.

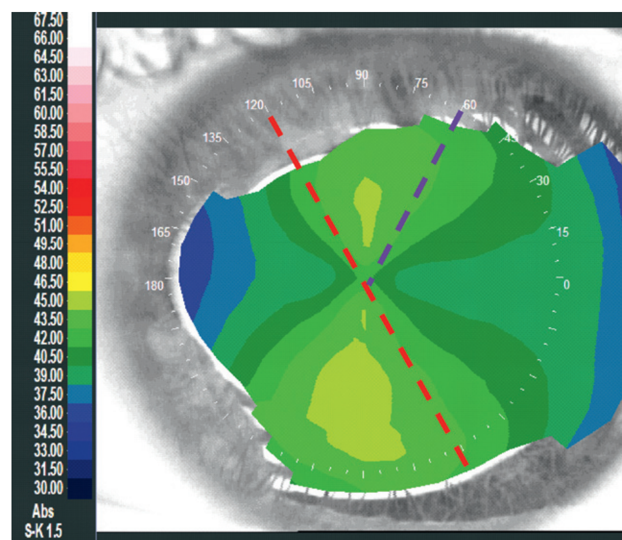



***Fig. 1.1.* Méridien et hémiméridien.**
*Le méridien dont l'axe est 120° est surligné en pointillés rouges. L'hémiméridien situé selon l'axe 60° est souligné en pointillés bleus.*

## Centre géométrique de la cornée

Le centre géométrique de la cornée (ou centroïde) est le repère topographique le plus évident, puisqu'il s'agit du point équidistant aux points situés sur le pourtour limbique. C'est un point qui peut servir d'origine (x = 0 – y = 0) pour définir un repère destiné à identifier par un couple de coordonnées l'ensemble des points de la surface cornéenne.

## Centre de visée cornéen (corneal sighting center)

Parmi l'ensemble des rayons lumineux émis par la source lumineuse ponctuelle fixée par le patient, on peut isoler le faisceau de rayons lumineux réfracté par la cornée qui est délimité par l'ouverture pupillaire (c'est le faisceau lumineux utile pour la formation de l'image fovéale). Le rayon central de ce faisceau incident définit la ligne de visée (*line of sight*). Le centre de visée cornéenne (*corneal sighting center*) correspond à l'intersection entre cet axe et la surface cornéenne (Fig. 1.2).

## Vertex cornéen

Le vertex est une notion qui dépend de la technique de mesure et d'observation. En topographie cornéenne, il correspond à l'intersection entre l'axe kératométrique (ou vidéotopographique) et la face antérieure de la cornée. En topographie spéculaire de Placido, cet axe relie le centre des mires utilisées pour la réflexion avec le centre de courbure local de la cornée. Le reflet de ce centre

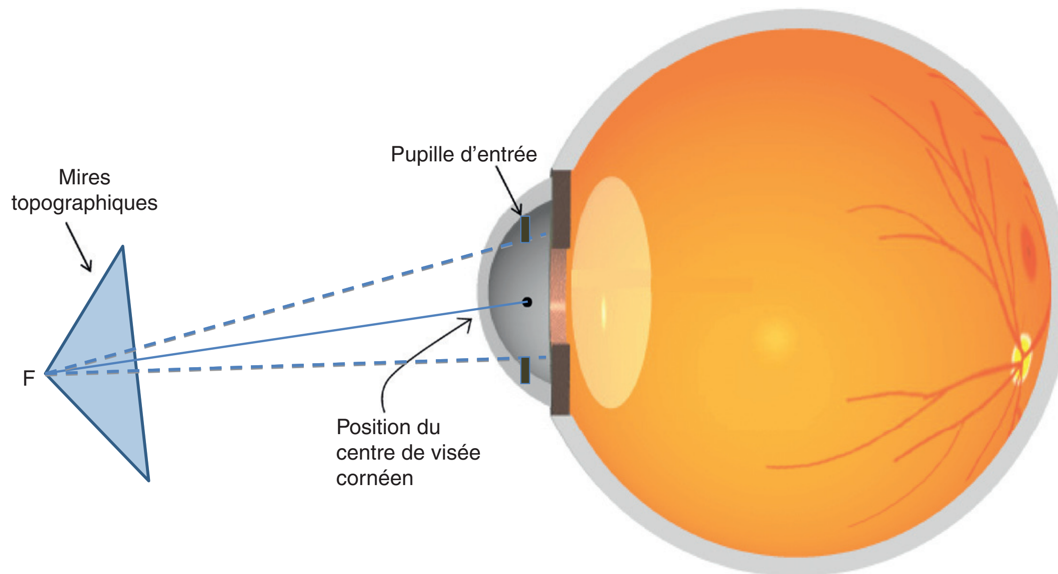



***Fig. 1.2. Représentation schématique de la ligne de visée (*line of sight*).***
*La pupille d'entrée est l'image virtuelle formée par la cornée de la pupille anatomique : c'est la pupille apparente, telle qu'on la perçoit quand on examine le segment antérieur d'un patient. Elle apparaît légèrement plus large et antérieure que la pupille anatomique. L'axe reliant le point de fixation F au centre de la pupille d'entrée E est la ligne de visée –* line of sight *: il est représenté en bleu et coupe la cornée au centre de visée cornéen* (corneal sighting center). *Un repérage aisé de ce point n'est pas possible en pratique clinique.*

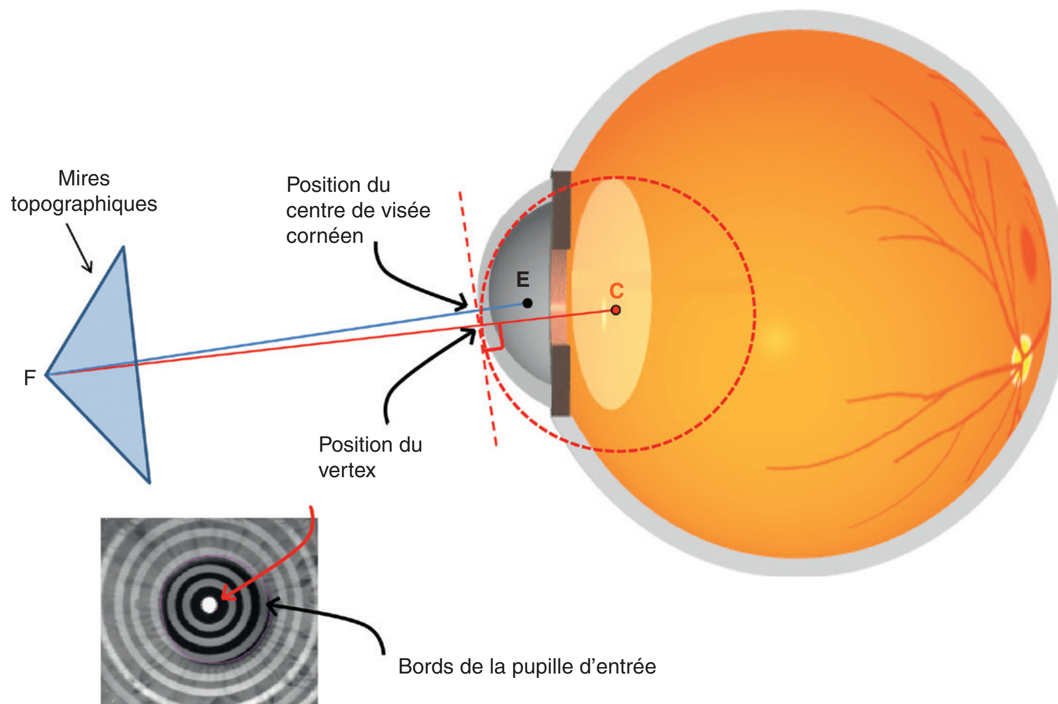



***Fig. 1.3. Représentation schématique de l'axe kératométrique (en rouge).***
*Il relie le centre de courbure cornéen C au point de fixation F. Du fait de l'absence de centre commun des surfaces réfractives de l'œil, et de l'excentricité de la fovéa, cet axe ne passe pas par le centre de la pupille d'entrée de l'œil. Si F est le centre des mires de Placido, alors la position du vertex est équivalente à celle de la position apparente du reflet de F sur la cornée. Habituellement, la projection du vertex est légèrement nasale vis-à-vis du centre géométrique de la pupille.*

est situé le long de cet axe (Fig. 1.3). On peut donc définir le vertex comme le siège apparent de la réflexion du centre des mires de Placido.

Par construction géométrique, la ligne tangente à la surface cornéenne en ce point est perpendiculaire (ou normale) à l'axe kératométrique. De fait, le terme anglo-saxon exact correspondant à ce point est « vertex normal ».

La localisation du vertex dépend de la stratégie de fixation du patient, qui peut varier légèrement d'un topographe à l'autre en fonction du repère fixé pendant la mesure. Il n'y a donc pas de « vertex absolu ».

La localisation du vertex vis-à-vis de la pupille traduit de manière indirecte le degré de rotation du globe oculaire lors de la fixation (*cf.* sur axes oculaires remarquables et angle kappa chapitre 3).

On peut aussi définir le vertex comme le point d'élévation maximale sur une carte d'élévation. Là encore, la localisation de ce point est loin d'être absolue ; en plus de l'orientation de la cornée avec le système de détection, la localisation d'un vertex est tributaire de certaines contraintes utilisées pour représenter l'élévation de la surface cornéenne (par exemple, le choix et l'alignement de la surface de référence).

## Apex cornéen

Il est défini dans la littérature comme le point de courbure maximale, ou le centroïde de la zone de cambrure maximale. Dans un œil où toutes les surfaces réfractives seraient symétriques, alignées sur un axe commun et concentriques avec la pupille irienne, l'apex cornéen serait à la fois le point de courbure maximale, le point le plus antérieur, et de plus confondu avec le centre géométrique de la cornée. Cette situation se rencontre dans le cas de dispositifs optiques comme l'objectif d'une lunette astronomique ou d'un appareil photo. Pour ces systèmes manufacturés, le centre géométrique de la face avant de l'objectif est également le point le plus cambré, tout en étant bien évidemment situé sur l'axe optique, et centré sur le ou les diaphragmes du dispositif.

En pratique, le terme « apex cornéen » peut être utilisé lors de l'examen d'une carte topographique de courbure pour désigner le point situé dans la zone centrale ou paracentrale où la courbure y apparaît comme maximale.

La définition générale de l'apex (point où la courbure est maximale) rend sa localisation absolue, c'est-à-dire liée à la distribution de la courbure de la cornée analysée, et indépendante de toute méthode de mesure topographique. En réalité, le fait de disposer de plusieurs types de courbure en topographie cornéenne (axiale, instantanée, etc.) expose potentiellement à une variation de la position de l'apex en fonction du type de courbure représenté. L'apex véritable, c'est-à-dire le point où la courbure est réellement maximale (indépendamment de la direction où l'on effectue la mesure), doit être repéré grâce aux cartes de courbure moyenne (*mean curvature*).

Le « décentrement » de l'apex cornéen est un signe fréquemment observé dans le kératocône ; il se fait dans une direction généralement temporale inférieure (vers la zone d'amincissement maximal), mais il existe une discordance parfois notable entre l'apex repéré sur la carte de courbure axiale et celui repéré sur la carte tangentielle quand la cornée subit une distorsion et prend un relief particulièrement asymétrique (ce qui est le cas dans le kératocône). S'il doit guider une adaptation de lentille, le repérage de la position de l'apex (point où la lentille aura tendance à se centrer) doit être effectué en représentation de courbure tangentielle (instantanée), ou mieux moyenne (ou gaussienne).

Enfin, la notion d'« apex » perd généralement de son sens chez des patients ayant subi une chirurgie cornéenne, en particulier démyopisante. En effet, la cornée centrale étant aplatie, la région la plus cambrée n'est plus ponctuelle mais globalement annulaire (raccord avec la zone non traitée au pourtour de la zone optique).

Le repérage du vertex est relativement aisé : en topographie cornéenne, on l'assimile au reflet du centre des mires de Placido.

En revanche, il n'existe pas de méthode directe pour repérer le centre de visée cornéen (*corneal sighting center*) ; ceci nécessiterait le recours à une instrumentation spécifique [3].

Le centre de visée cornéen est généralement situé en supérieur et temporal du vertex. L'apex est généralement situé en inférieur du vertex. La distance moyenne entre l'apex et le centre de visée cornéen a été mesurée à 0,82 ± 0,57 mm [3].

## Modèles géométriques de surface cornéenne

L'étude fine et exhaustive des propriétés géométriques de la surface cornéenne peut s'avérer relativement complexe, surtout si on l'aborde de manière analytique, au moyen de formules issues du calcul en géométrie tridimensionnelle.

Il peut être appréhendé de manière plus aisée en rapportant la surface cornéenne à des surfaces mathématiques qui fournissent le formalisme élémentaire requis pour étudier les propriétés topographiques que ces surfaces et le dôme cornéen ont en commun. Dans le « bestiaire » mathématique que représente l'ensemble des surfaces dites « quadriques », nous n'aborderons que celles qui sont couramment utilisées en topographie cornéenne pour modéliser la cornée, et/ou servir de surface de référence en topographie d'élévation.

La sphère vient en premier à l'esprit, mais celle-ci fournit surtout un « révélateur », qui révèle ce qui départit la cornée analysée d'une surface purement sphérique. En topographie d'élévation, on représente en fait la surface de cornée analysée à travers ses « écarts » à une surface de référence calculée, le plus souvent sphérique.

L'ellipsoïde est une surface asphérique qui se prête donc volontiers à l'étude des effets de l'asphéricité en topographie, et à la compréhension des différents modes d'analyse de la courbure. L'ellipsoïde est engendré par l'élongation d'une sphère sur un, deux ou trois de ses axes. Quand un seul axe est élongé, l'ellipsoïde possède une symétrie de révolution. Si deux ou trois de ses axes subissent une élongation, l'ellipsoïde est torique.

La cornée peut être simplement modélisée comme une calotte emportant un des sommets de cette surface. Ce type de modélisation sera largement utilisé pour expliquer les différents modes de représentation de la courbure cornéenne (Fig. 1.4).

D'autres surfaces asphériques peuvent être utilisées pour représenter certaines propriétés géométriques de la surface de la cornée, comme les conoïdes : ces surfaces asphériques sont engendrées par la révolution d'une courbe asphérique (section conique) autour d'un axe médian (Fig. 1.5). Les conicoïdes sont engendrées par « interpolation » entre deux sections coniques perpendiculaires entre elles (la surface obtenue est également

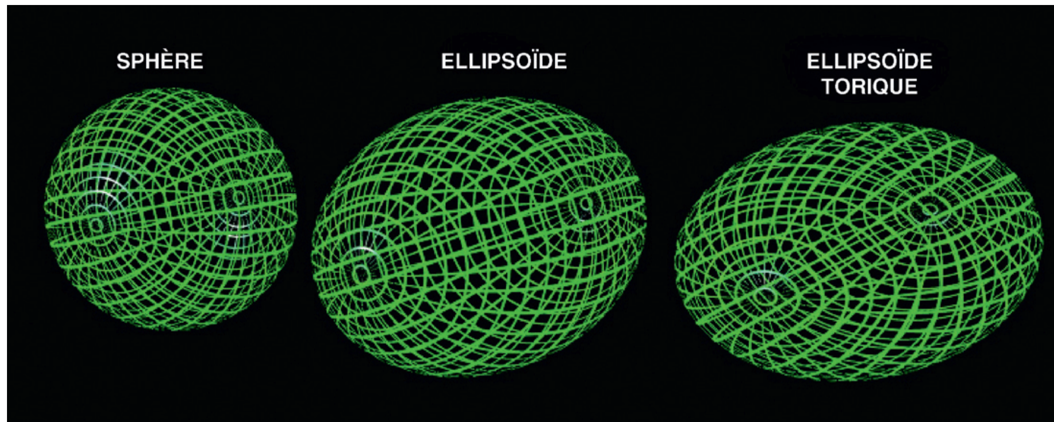



**Fig. 1.4.** *Exemple de surfaces élémentaires utilisées pour modéliser la surface cornéenne.*

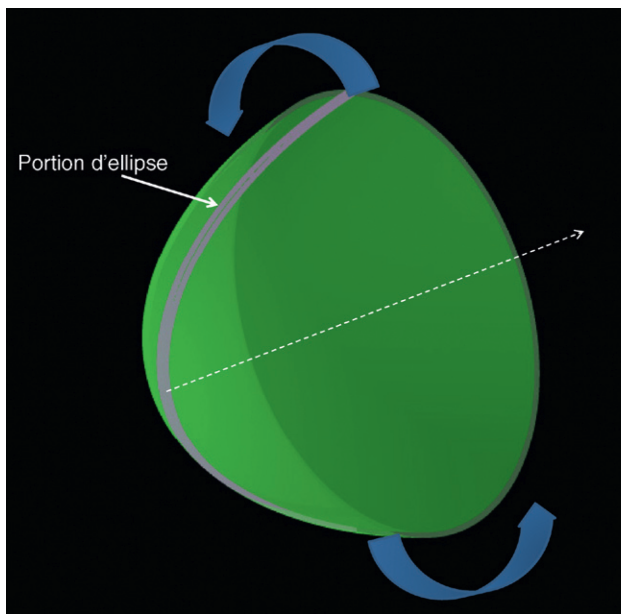



**Fig. 1.5.** *Par rotation d'une courbe (ici une portion d'ellipse, représentée en gris) autour d'un axe, on peut construire une surface conoïde pour modéliser la cornée.*

dite torique si ces deux méridiens n'ont pas la même courbure). Il est important de noter que toutes les surfaces engendrées de la sorte sont « symétriques », au sens où il est possible de leur trouver au moins deux axes de symétrie axiale, autour desquels elles pourraient être séparées en deux moitiés identiques, comme les cartes à jouer.

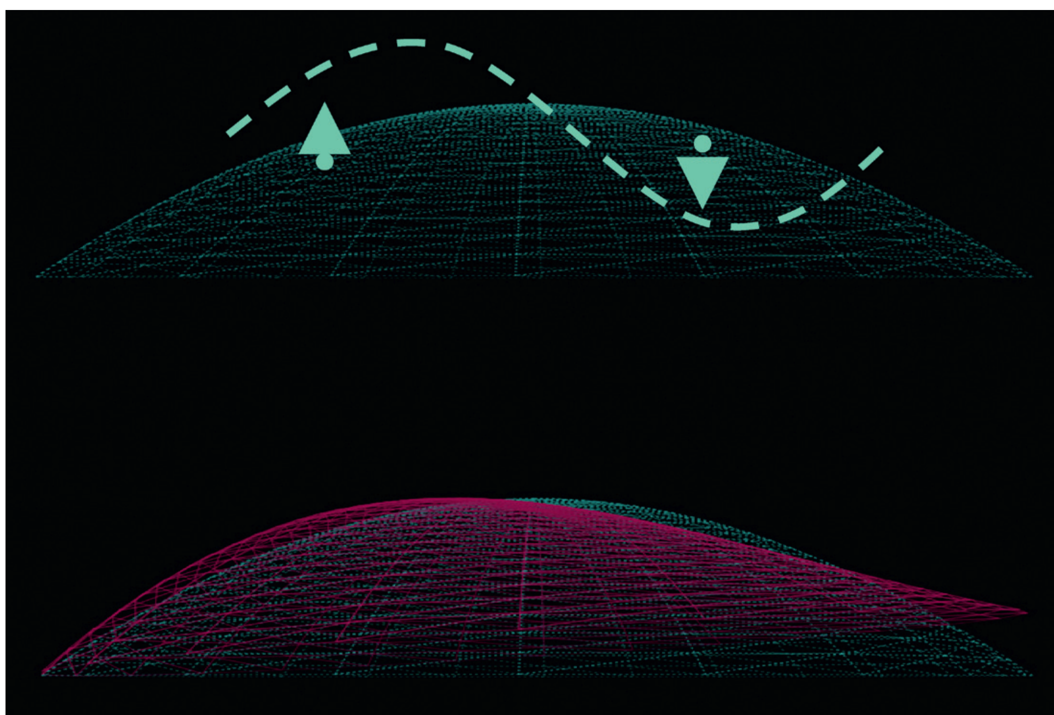
## Symétrie et asymétrie – Énantiomorphisme

Les surfaces mathématiques typiquement utilisées pour représenter la cornée (*cf.* paragraphe précédent) sont généralement indemnes d'asymétrie, au sens « impair » du terme. Le caractère asymétrique doit se comprendre ici comme le faible degré voire l'absence de symétrie par rapport à un axe médian (symétrie de type « axial »). L'ajout de fonctions impaires à l'équation d'un ellipsoïde permet de modéliser des surfaces asymétriques (Fig. 1.6). La cornée représentée sur la carte topographique de courbure de la Fig. 1.1 présente une légère asymétrie verticale (les hémiméridiens de la moitié inférieure de cette cornée sont légèrement plus cambrés que ceux de la moite supérieure).

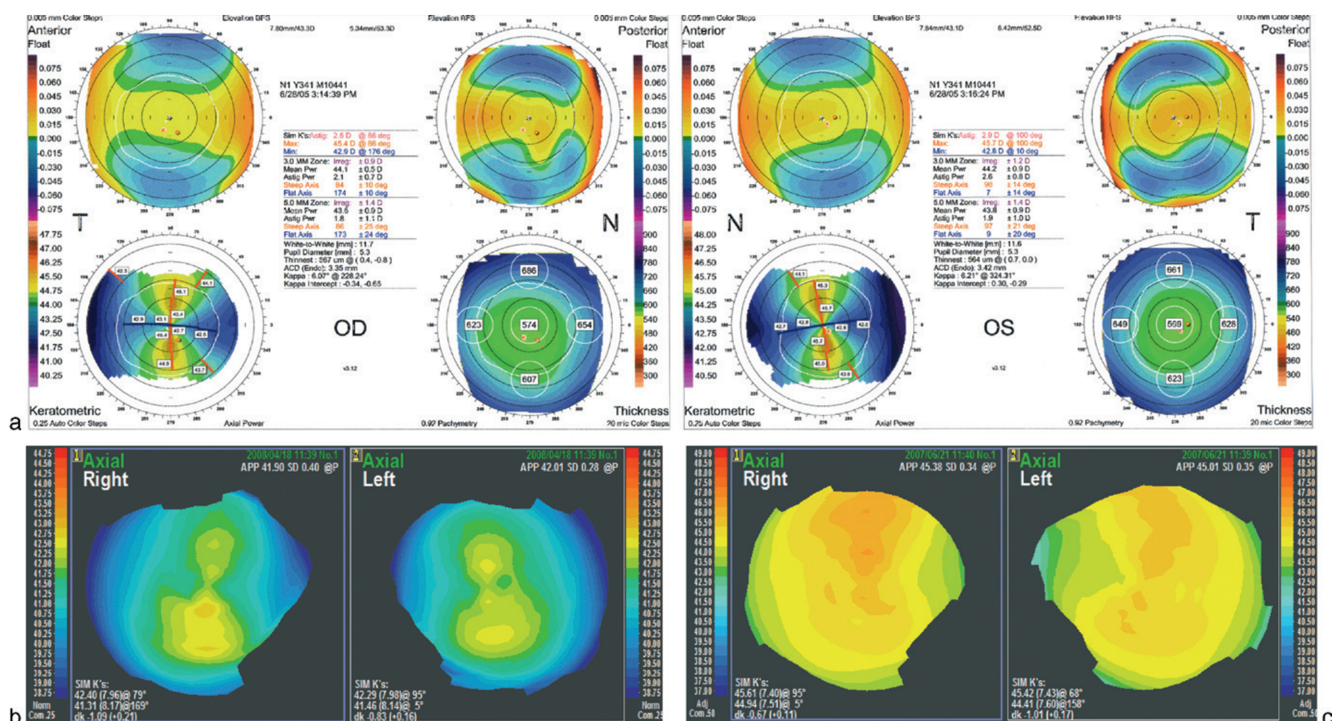
Du grec ancien *enantios* (« opposé »), et *morphé* (« forme »), le qualificatif énantiomorphisme s'utilise en topographie cornéenne pour désigner les cartes où existe une symétrie en miroir entre l'œil droit et l'œil gauche : cet aspect est physiologique. À l'inverse, la réduction de l'énantiomorphisme peut traduire une pathologie débutante (ex : kératocône). De fait, l'existence d'un énantiomorphisme entre les yeux droit et gauche (Fig. 1.7) est un élément favorable vis-à-vis d'une indication en chirurgie réfractive.

## Zones cornéennes

Le concept de « zone » découle des problèmes rencontrés à l'époque de la kératotomie radiaire. La zone centrale est définie comme celle dont le diamètre est compris entre 1 et 3 mm ; elle est entourée de la zone paracentrale (de 3 à 7 mm environ), puis de la zone périphérique (7 à 11 mm). À l'ère de la chirurgie réfractive photoablative, on peut préférer une division plus fonctionnelle, et on distingue zone optique fonctionnelle et zone non fonctionnelle. La zone optique fonctionnelle est celle dont la lumière incidente qui y est réfractée est utile à la vision fovéale (les rayons lumineux issus du point fixés sont réfractés par cette zone et franchissent la pupille sans être stoppés par l'iris, avant de se focaliser sur la fovéa) (Fig. 1.8A) [4]. Cette zone a pour centre géométrique le centre de visée cornéen (*corneal sighting center*). La zone plus périphérique est la zone « non utile » pour la vision. Le diamètre et la position de la zone optique fonctionnelle fovéale varient évidemment en fonction du diamètre pupillaire (lui-même fonction de divers facteurs physiologiques et extrinsèques comme la distance de fixation et l'éclairement ambiant), de la profondeur de la chambre antérieure et du pouvoir optique de la cornée (Fig. 1.8B). La zone optique fonctionnelle utile pour la vision extra-fovéale et périphérique est plus étendue que la zone



**◗ *Fig. 1.6.*** ***Une surface asymétrique (treillis rouge) peut être générée par ajout d'une fonction asymétrique (profil symbolisé par les pointillés) sur une surface conicoïde (treillis bleu).***




**◗ *Fig. 1.7.*** ***Cartes topographiques où les cartes de l'œil droit et de l'œil gauche sont juxtaposées, et qui présentent un haut degré d'énantiomorphisme (symétrie en miroir).***
*a. Cartes Orbscan en mode* Quad Map. *b et c. Cartes de topographie axiale (OPD scan).*

optique fovéale : son extension varie en fonction de l'excentricité des points sources concernés. Il n'existe pas de méthodes cliniques simples pour visualiser ces zones, et l'on considère généralement que la zone cornéenne centrale (3 mm centraux) est la zone la plus utile pour la vision fovéale.

## Courbure apicale

La courbure apicale est la courbure mesurée à l'apex de la cornée. Ce point étant défini comme le point de courbure maximale, la courbure apicale est donc la courbure

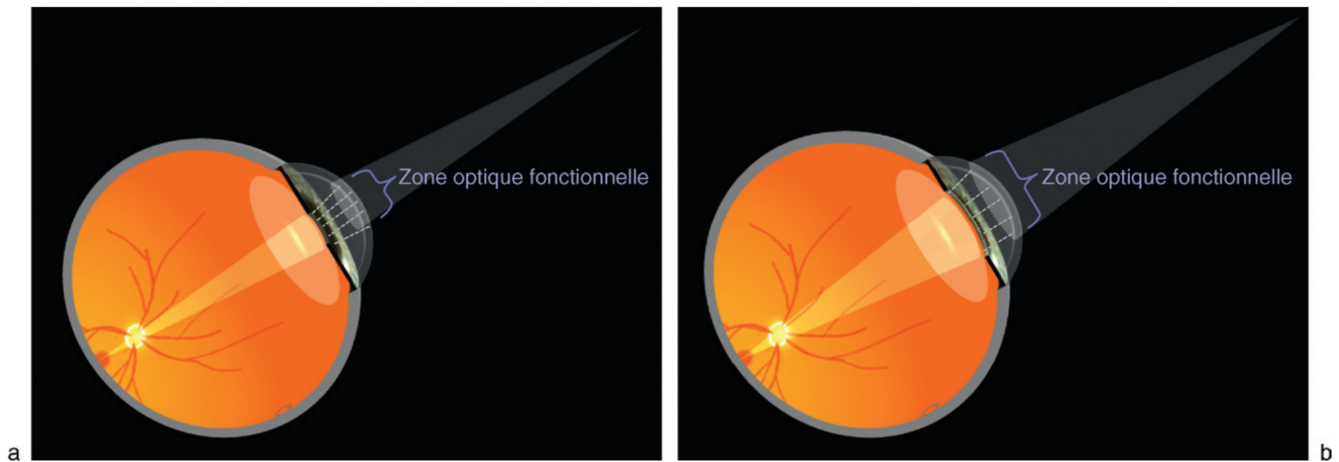



***Fig. 1.8. Représentation schématique de la zone optique fonctionnelle cornéenne pour la vision fovéale.***
*a. Pour un diamètre pupillaire et un point fixé donné : quel que soit le point fixé, elle est plus large que la pupille anatomique. b. Pour un diamètre pupillaire et un point fixé donné en ambiance mésopique : l'élargissement du disque pupillaire implique un élargissement concomitant de la zone optique fonctionnelle.*

maximale de la surface cornéenne considérée ; ceci n'est plus forcément vrai après chirurgie cornéenne démyopisante où la cornée centrale est « décambrée » pour en diminuer la puissance optique. Quand on modélise la cornée comme une surface régulière (ellipsoïde, où chaque méridien du profil cornéen est une portion d'ellipse), la courbure apicale d'un profil cornéen est celle du cercle qui épouse au mieux le sommet du méridien considéré. Ce cercle est dit « osculateur ». La courbure apicale permet le calcul de la « puissance kératométrique centrale » (à l'apex cornéen, les dioptries de courbure calculées avec un indice de réfraction minoré ou « kératométrique » sont du même ordre que celles de la puissance optique de la cornée).

## Conséquences cliniques

– La topographie cornéenne est une étude morphologique et fonctionnelle de la cornée. Dans le cadre de l'adaptation de lentilles de contact, le repérage de l'apex cornéen est important car c'est autour du point de cambrure maximal que peut pivoter une lentille rigide.

– Idéalement, la réalisation d'une procédure de chirurgie réfractive doit être conduite vis-à-vis du centre de visée cornéen (*corneal sighting center*), et qui n'est pas identifiable par les méthodes cliniques courantes, mais se situe le plus souvent en temporal du vertex topographique.

– Les cartes topographiques spéculaires courantes sont centrées sur le vertex, qui n'est pas un point remarquable ni sur le plan morphologique ni fonctionnel. L'emplacement du vertex n'est pas celui d'un « axe optique » quelconque de l'œil.

– L'existence d'un haut degré d'énantiomorphisme est un argument important en faveur de la normalité de l'aspect topographique.

**Références**

[1] Goto E. The brilliant beauty of the eye : light reflex from the cornea and tear film. Cornea 2006 ; 25 (10 Suppl. 1) : S78–81.
[2] Alkhaldi W, Iskander DR, Zoubir AM, Collins MJ. Enhancing the standard operating range of a Placido disk videokeratoscope for corneal surface estimation. IEEE Trans Biomed Eng 2009 ; 56 (3) : 800–9.
[3] Mandell RB, Chiang CS, Klein SA. Location of the major corneal reference points. Optom Vis Sci 1995 ; 2 (11) : 776–84.
[4] Harris WF. Effective corneal refractive zone in terms of Gaussian optics. J Cataract Refract Surg 2008 ; 34 (12) : 2030–5.

Chapitre 2

# *De la réflexion spéculaire à la topographie cornéenne*

*Géométrie simplifiée de la réflexion spéculaire*

*Mesure de la courbure par réflexion spéculaire*

*Acquisition des données de courbure*

La face antérieure de la cornée est recouverte d'un film lacrymal dont les propriétés réfléchissantes permettent de former l'image virtuelle de sources lumineuses (Fig. 2.1a et b). La surface antérieure de la cornée agit alors comme un miroir convexe. De la déformation des images réfléchies, on peut déduire certaines des propriétés de la surface réfléchissante : cette idée a été mise en œuvre pour la réalisation des appareils de mesure kératométrique, puis kératoscopique.

Les premières manifestations d'intérêt connues pour la topographie cornéenne remontent à l'année 1619, lorsque Christopher Scheiner étudia les images formées par la réflexion sur la cornée. Cet astronome jésuite allemand conçut une méthode pour estimer la courbure de la cornée. Il fabriqua une série de billes dont il connaissait la courbure de chacune. Il suffisait alors de trouver laquelle des billes produisait un reflet comparable à celui de la cornée étudiée. Le principe de la kératométrie était né. Si ces propriétés réflectives semblent avoir été mises à profit à des fins cliniques par David Brexster, physicien écossais, en 1898, l'invention du premier instrument destiné à l'étude de la cornée (kératoscope) est à mettre au crédit de Henry Goode, de l'université de Cambridge, en 1847. En 1880, Placido conçut un disque plat avec une série de cercles concentriques noirs et blancs, combiné à un appareil photographique ; le photokératoscope. La photokératoscopie peut être considérée comme l'ancêtre de la vidéokératographie d'aujourd'hui [1]. Les réflexions cornéennes des cercles pouvaient également être observées directement par une petite ouverture centrale tandis que le disque était maintenu le long de la ligne de visée. Un profil ovale régulier indiquait un astigmatisme régulier ; il fallait que l'astigmatisme atteigne au moins 3 dioptries en magnitude pour être détecté avec cette technique.

Gullstrand a publié un article en 1896, dans lequel il décrivait une méthode pour déterminer la distance entre deux points sur une photographie kératoscopique,

a


b




**Fig. 2.1.** ***Propriétés réfléchissantes du film lacrymal.***
*a. Réflexion par le film lacrymal d'une cornée de cheval : on y distingue le reflet de l'image du photographe. b. Réflexion par le film lacrymal d'une cornée humaine : à droite, l'embrasure de la fenêtre fixée par le sujet au moment du cliché.*

ouvrant ainsi la voie à la mesure du rayon de courbure instantané grâce à un algorithme de tracé d'arc de cercle. Une partie de ses travaux lui a valu le prix Nobel en 1911. Les travaux ultérieurs importants dans l'étude de la topographie cornéenne ont été réalisés par Mandell, qui a modélisé le profil cornéen à l'aide de sections coniques, puis Bonnet et Cochet, qui ont développé des méthodes pour représenter l'élévation cornéenne à l'aide de mesures stéréophotographiques.

La topographie spéculaire reprend et généralise ce principe à l'ensemble de la surface de la cornée. Les cartes topographiques sont obtenues grâce à l'analyse automatique de l'image de la distorsion de mires lumineuses projetées sur le dôme cornéen. La vitesse de calcul des microprocesseurs atteinte au cours des années quatre-vingt a permis de concevoir des programmes informatiques dédiés à la mesure de la courbure cornéenne après numérisation de l'image du reflet des mires de Placido : cette approche constitue l'essence de la vidéotopographie cornéenne assistée par ordinateur. Un motif constitué de cercles concentriques de couleurs alternées, généralement blanches et noires, est projeté sur la cornée. L'image réfléchie est capturée par une caméra généralement coaxiale avec le centre du motif projeté, puis analysée par un programme informatique. Une carte topographique est alors établie en fonction des valeurs locales calculées.

Les algorithmes de calcul mathématique mis en jeu au cours de ce processus sont hors du propos de cet ouvrage, mais il est important d'étudier certaines des particularités géométriques de la mesure, car elles ont une incidence pour l'interprétation des cartes topographiques spéculaires.

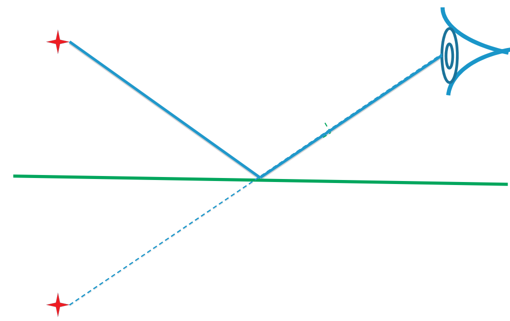




**Fig. 2.2. Réflexion plane (en haut).**
*L'image réfléchie subit une inversion (exemple de réflexion plane en milieu naturel).*

# Géométrie simplifiée de la réflexion spéculaire

## Réflexion par un miroir plan

La réflexion par un miroir parfaitement plan permet de former une image virtuelle et inversée de la source qui s'y réfléchit. L'image réfléchie est celle de la source à une inversion près : on parle de « symétrie en miroir » (Fig. 2.2).

## Réflexion par un miroir sphérique

Si le miroir est courbe, l'image réfléchie va être, en plus d'inversée, distordue vis-à-vis de celle de la source. La distorsion de l'image provient du fait que les points formant l'image réfléchie subissent un déplacement de leur position relative par rapport à celle occupée dans l'image source (Fig. 2.3).

Pour aborder l'étude de la réflexion d'une source lumineuse par un miroir sphérique, on peut simplifier le problème et chercher une relation entre le déplacement apparent du reflet du point source dans l'image réfléchie et la courbure du miroir. Les Fig. 2.4 et 2.5 fournissent une représentation du problème. Il est important de réaliser que dans tous les cas, la position de l'image observée sera fonction de la position de l'observateur :

– quand l'observateur (la caméra qui saisit l'image réfléchie) est aligné avec la source et le centre du miroir, l'image est elle-même alignée avec l'observateur, la source et le centre de courbure du miroir. Pour une source située « loin » du miroir, l'image apparaît formée à une distance comprise entre la surface du miroir et le centre de courbure de celui-ci (Fig. 2.4). L'image virtuelle réfléchie d'une source ponctuelle située à une distance importante (considérée comme infinie) du miroir apparaît localisée entre la surface du miroir et son centre, soit à un demi-rayon de courbure. Ceci signifie que le foyer d'un miroir convexe sphérique est situé à la moitié de son rayon ;

– quand l'observateur n'est pas aligné avec la source, la géométrie du système se complique légèrement ; l'image apparaît grâce à la réflexion spéculaire sur la surface réfléchissante (le miroir) et sa captation par l'observateur. La réflexion se fait selon un angle égal à l'angle d'incidence des rayons émis par la source. Cet angle est défini vis-à-vis de la normale à la surface du miroir. Cette normale matérialise la direction localement perpendiculaire à la surface et passe par le centre de courbure du miroir (Fig. 2.5).

# Mesure de la courbure par réflexion spéculaire

On peut concevoir un système où l'on projette un objet lumineux dont la hauteur et la position relative au miroir sphérique sont connues. On peut ensuite capturer l'image formée de la réflexion de l'objet, selon une



**Fig. 2.3.** *Réflexion par une surface sphérique du même photographe qu'à la Fig. 2.1 (Jardin du Palais Royal, Paris).*

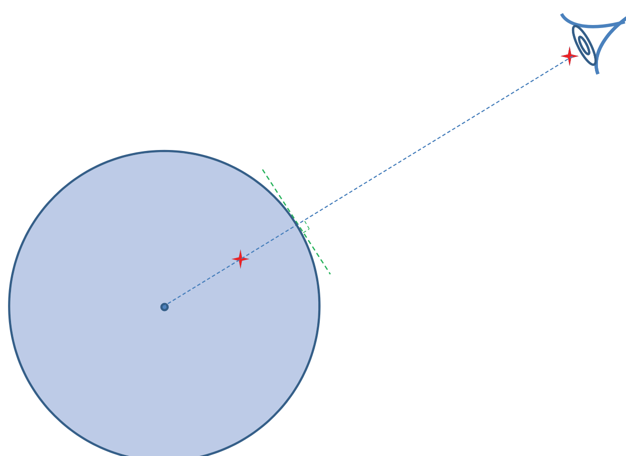


**Fig. 2.4.** ***Réflexion par un miroir sphérique d'une source ponctuelle (matérialisée par la croix rouge).***
*L'observateur, la source et le centre de courbure du miroir sont alignés. L'image réfléchie est perçue comme située entre le centre et le bord adjacent du miroir sphérique.*

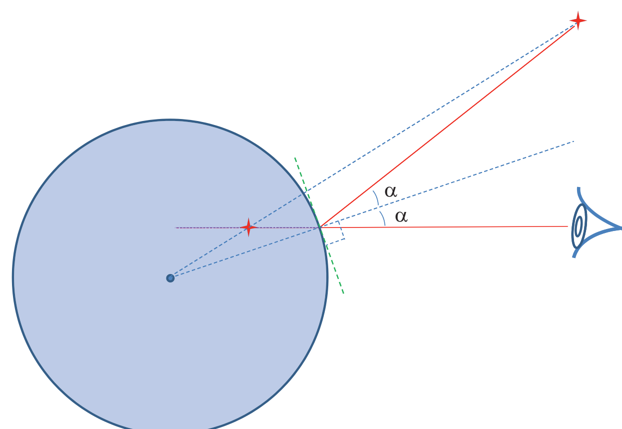



**Fig. 2.5.** ***L'observateur et la source ne sont pas alignés avec le centre du miroir : les rayons lumineux qui atteignent l'observateur sont réfléchis selon un angle égal de part et d'autre de la normale à la surface au point de réflexion.***

direction également connue. La mesure de la hauteur de l'image réfléchie de l'objet et la connaissance de la géométrie du système permettent d'obtenir la valeur du rayon de courbure du miroir dans le plan de mesure (Fig. 2.6). Ceci n'est qu'un exemple simplifié, et valable sous certaines conditions mais il montre que la connaissance des propriétés géométriques liées à la réflexion par une surface sphérique réfléchissante peut être utilisée pour calculer la courbure de cette surface.

Ces principes sont utilisés pour la mesure kératométrique (Fig. 2.7) : on recueille l'image réfléchie de deux mires projetées sur la cornée, et le rayon de courbure du méridien est déduit du rapport entre les distances — connues — des mires objets et images. Ce type de mesure permet une mesure de la courbure paracentrale.

Le profil de la cornée épouse une géométrie circulaire dans la région apicale, et dans cette région seulement. La mesure paracentrale ne permet pas d'extrapoler la courbure en moyenne et extrême périphérie de la cornée.

Si l'on projette un ensemble de cercles concentriques au lieu d'une simple paire de mires, on obtient autant de point d'analyse que la précision d'analyse de l'image recueillie l'autorise. Les Fig. 2.8, 2.9 et 2.10 permettent de comparer les images obtenues après réflexion d'un disque de Placido par des surfaces modélisant la face antérieure de la cornée aux propriétés diverses : sphérique, torique, asymétrique (simulations informatiques). La kératoscopie directe était effectuée en tenant proche de l'œil du patient un disque de Placido (Fig. 2.11)

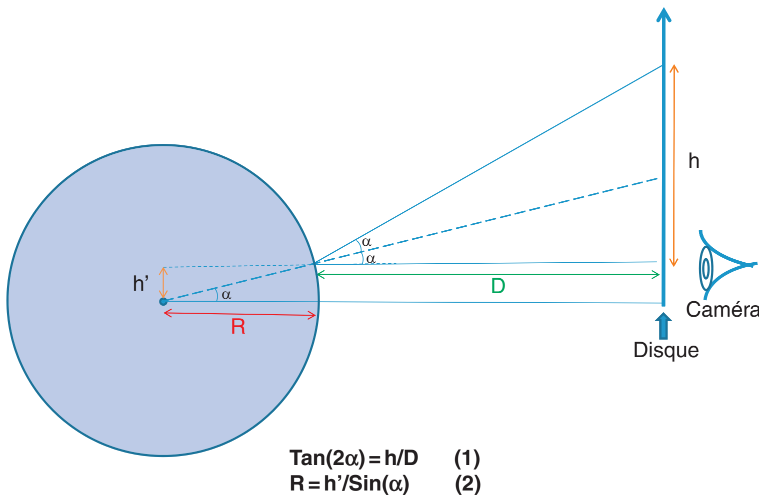



***Fig. 2.6. Détermination du rayon R de la surface sphérique réfléchissante.***
*Pour une distance D et hauteur h connus de l'objet, et pour une position déterminée de la caméra de recueil de l'image réfléchie, il est possible de calculer R. L'équation (1) fournit la valeur de l'angle α :*
*Tan (2 α) = h/D (1)*
*L'équation (2) donne la valeur de R, pour un angle α petit :*
*R ≈ h'/Sin (α) (2)*
*Cette approche permet de calculer la valeur du rayon d'une calotte sphérique au voisinage de son sommet. La cornée n'est pas une surface purement sphérique, des algorithmes plus sophistiqués doivent être utilisés pour le calcul de courbure sur l'ensemble de la surface cornéenne.*




***Fig. 2.7. Kératomètre de Javal, reposant sur l'affrontement du reflet de mires graduées par le sommet de la cornée.***

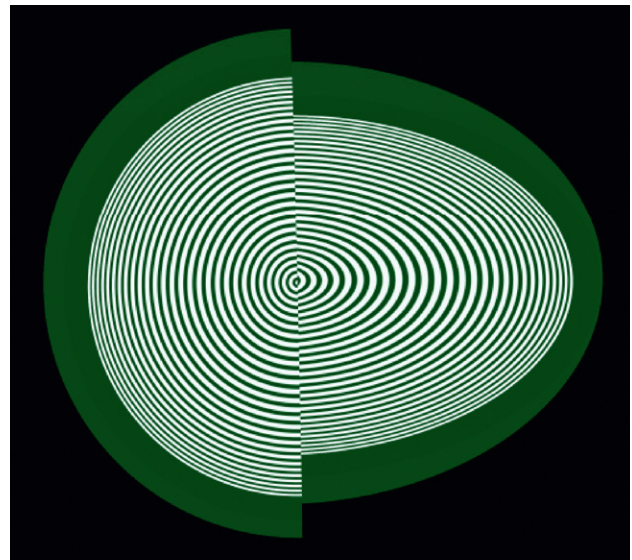


***Fig. 2.8. Simulation informatique du reflet d'une mire de Placido.***
*À gauche, est représentée une demi-surface cornéenne modélisée par une calotte parfaitement sphérique. À droite, la surface est torique : le méridien le plus cambré est vertical (90°), le méridien le plus plat, horizontal (0°). Les mires (leur image réfléchie) se rapprochent si le rayon de courbure diminue, et inversement. La position de la caméra qui capture l'image est ici confondue avec le centre des mires, et coaxiale avec le centre de la coupole sphérique servant à modéliser l'hémicornée gauche.*

percé en son centre pour permettre à l'examinateur d'observer son reflet sur la cornée examinée. La photo ou vidéokératoscopie était une version automatisée de cette technique, l'œil de l'examinateur étant remplacé par un appareil photographique, comme avec le photokératoscope PKS 1000 (Nidek) (Fig. 2.12). En plus d'une étude qualitative de la courbure cornéenne, le calcul de la courbure était possible à partir des clichés effectués. Le CorneaScope était ainsi un instrument développé dans les années soixante-dix et qui utilisait un appareil photographique Polaroïd pour produire des clichés, dont le motif était ensuite comparé à des tracés de référence.

L'étape suivante fut de concevoir une analyse automatisée par algorithme informatique de l'image de la réflexion d'une mire de Placido. L'essor de la technique de kératotomie radiaire vers la fin des années quatre-vingt a relancé l'intérêt pour une technique fiable et reproductible d'analyse topographique. Les vidéokératoscopes ont ainsi été développés afin d'utiliser des méthodes informatisées de capture des informations des images kératoscopiques et de permettre la détection d'une quantité de déformation plus faible que celle détectée par la simple inspection [2]. Le premier véritable vidéokératoscope fut le *Computed Anatomy Corneal Modeling System* (CMS). Cet instrument introduit

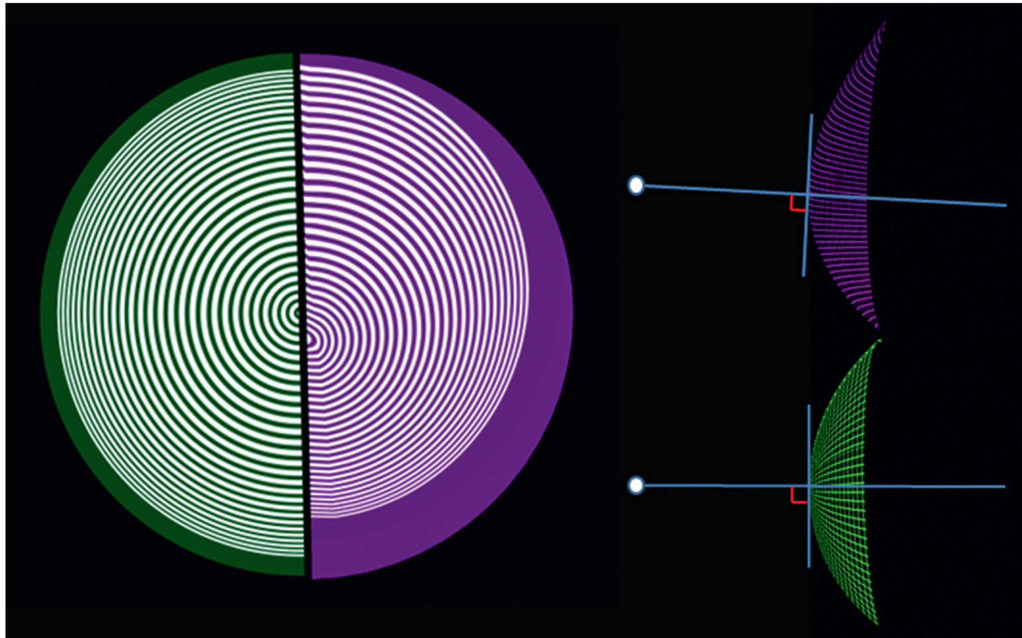


**Fig. 2.9. Simulation informatique du reflet d'une mire de Placido.**
*À gauche, est représentée une demi-surface cornéenne modélisée par une calotte parfaitement sphérique. À droite, la surface est asymétrique, comme peut l'être celle d'une cornée atteinte de kératocône. Par comparaison avec l'image de la réflexion par une surface sphérique, les hémiméridiens inférieurs apparaissent plus cambrés, et les hémiméridiens supérieurs légèrement moins cambrés (conformément au principe de rapprochement des mires sur les zones les plus cambrées, et de leur éloignement sur les zones les moins cambrées). L'image réfléchie du centre des mires de Placido (ou reflet central) est décalée vers le bas sur l'hémicornée asymétrique. L'image du reflet central se situe à sur une ligne formée par le centre des mires C, et la normale à la surface au point le plus proche de C, appelé vertex. Ce point n'est plus au centre géométrique de la surface. Rappelons que le déplacement du reflet est fonction de l'axe utilisé pour l'observation (donné par la position de la caméra qui capture l'image, confondu ici avec le centre des mires, et coaxial avec le centre de la coupole sphérique servant à modéliser l'hémicornée gauche). Ce point ne correspond pas forcément à l'apex, qui est le point de courbure maximal, indépendamment de toute orientation.*

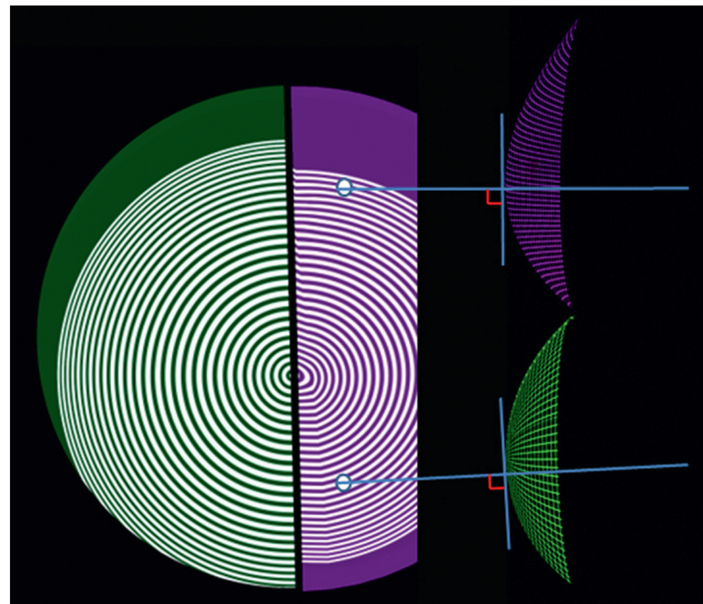


**Fig. 2.10. Simulation informatique du reflet d'une mire de Placido ; les surfaces sont identiques à celles utilisées pour la Fig. 2.9 : seule la position relative de la mire de Placido a été modifiée (décalée en inférieur).**
*Dans cette configuration, les reflets centraux (vertex) sont quasiment confondus. La carte obtenue pour l'hémisurface sphérique doit logiquement être identique (invariance car courbure constante : noter l'aspect inchangé de l'espacement des mires). La carte obtenue pour la surface asymétrique sera quant à elle différente. Cet exemple souligne la relativité de la notion de vertex, dont la localisation dépend de l'alignement de la cornée vis-à-vis de l'axe kératométrique.*



**Fig. 2.11. Disque portatif de Placido.**
*Noter l'orifice central perforé pour permettre à l'examinateur d'observer directement le reflet des mires produit par le dioptre cornéen.*

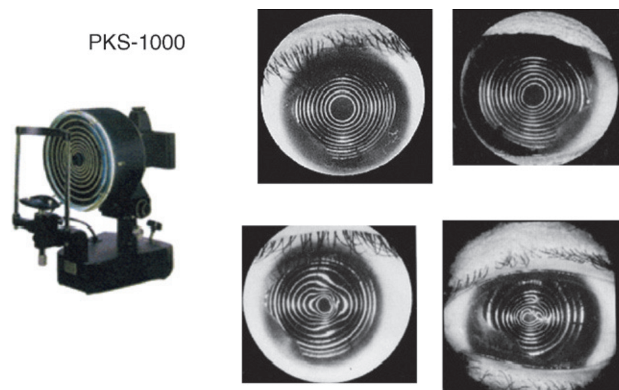



**Fig. 2.12. Photokératoscope Nidek PKS 1 000 et exemples de clichés produits par l'appareil photo qui était couplé à l'instrument.**




**Fig. 2.13. Vidéotopographe EyeSys.**
*Le périphérique d'acquisition était relié à un micro-ordinateur chargé de l'importation et de l'analyse automatisée de l'image du reflet des mires de Placido.*

l'utilisation d'une échelle colorimétrique. Il fut le prédécesseur d'un instrument plus abouti, le TMS-1 (Tomey Technology, Cambridge, Massachusetts). En 1989, l'instrument EyeSys (EyeSys Technologies, Houston, Texas) (Fig. 2.13) fut introduit. Le degré d'analyse d'une cornée individuelle était basé sur l'analyse de plusieurs milliers de points et la représentation de la courbure de la cornée prend généralement la forme d'une carte colorée du rayon de courbure local de la surface cornéenne. La généralisation rapide de ces instruments a permis d'évaluer les détails topographiques de la cornée normale, qui apparaissent souvent chez un même individu comme des images en miroir (énantiomorphisme) avec une topographie asphérique souvent légèrement asymétrique [3].

Ainsi naquit la vidéotopographie cornéenne informatisée; la Fig. 2.14 représente des instruments topographiques parmi les plus récents.

## Acquisition des données de courbure

L'obtention de données exploitables en topographie nécessite un positionnement adéquat du sujet. Le patient est assis, et sa tête repose sur la mentonnière et est en contact avec la bande d'appui frontal (Fig. 2.15). En fonction du topographe, un système de mire permet d'approcher le cône équipé des mires de Placido (et plus généralement le système d'acquisition) de l'œil du patient. Juste avant le déclenchement de la mesure, généralement effectué par une pression du joystick (Fig. 2.16), il faut demander au patient de ne pas cligner et de demeurer aussi statique que possible. Une fois l'acquisition terminée, il est recommandé de vérifier la qualité de l'acquisition, même si celle-ci a été jugée exploitable par le topographe (les données jugées non fiables ou non exploitables sont rejetées, invitant l'utilisateur à effectuer une nouvelle mesure). Certains logiciels fournissent un score de qualité concernant la mesure topographique.

La topographie spéculaire repose sur le recueil puis l'analyse d'un « reflet » : celui des mires de Placido (Fig. 2.17). Les cartes topographiques spéculaires sont centrées sur le reflet du centre de ces mires. Ce reflet n'est pas confondu avec le centre géométrique de la cornée, et ne correspond à aucun repère anatomique ou fonctionnel particulier : sa position définit celle du vertex. En ce point, la tangente à la surface cornéenne est perpendiculaire (normale) à l'axe qui relie le vertex et la mire de fixation et dénommé axe vidéokératoscopique.

Quand le patient fixe une mire coaxiale avec le centre du disque de Placido, l'orientation du globe est telle qu'après réfraction par les milieux oculaires, il s'en forme une image fovéale (Fig. 2.18a). L'œil n'est pas un système centré; la pupille et le limbe sclérocornéen sont rarement concentriques. La cornée, le cristallin et la pupille irienne ont des centres et des axes de symétrie distincts; tout au plus il est possible de théoriser un « meilleur axe moyen » (*best fit axis*) à partir des axes




**Fig. 2.14. Vidéotopographe TMS 4 et 5 (Tomey).**
*Le TMS 4 (à gauche) est un topographe de type Placido. Le TMS 5 (à droite) est un topographe muni d'un disque de Placido et d'une caméra Scheimpflug permettant le recueil conjoint de données d'élévation et pachymétriques.*

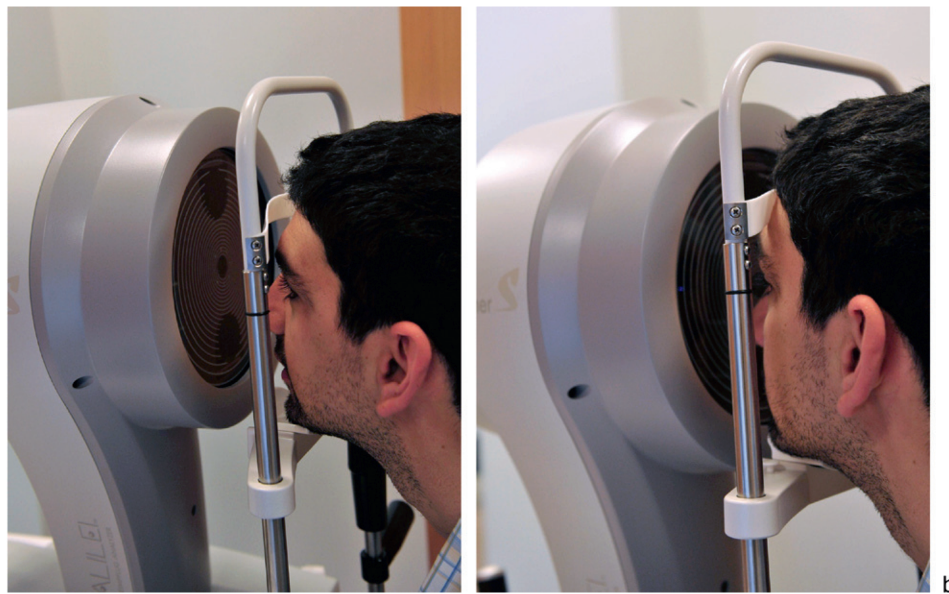



**Fig. 2.15. Positionnement du patient.**
*À gauche, on observe un mauvais positionnement du sujet : noter le recul du menton sur la mentonnière, et l'absence de contact avec la sangle d'appui frontal. À droite, le patient est correctement positionné : ce topographe est muni d'un repère sur le montant vertical du système d'appui sur lequel l'œil du patient doit être aligné.*



**Fig. 2.16.** ***Utilisation du joystick pour déplacer la tête d'acquisition jusqu'à obtenir un bon alignement de la cornée avec le système de mesure.***
*Cette manœuvre est guidée par la présence de repères digitaux en surimpression.*

de symétrie respectifs des principaux dioptres oculaires (Fig. 2.18b). Cet axe est parfois étiqueté « axe optique » dans la littérature, mais ce terme peut induire une confusion, car cet axe n'a rien de fonctionnel ; certes, dans un dispositif optique manufacturé comme une lunette astronomique, l'axe commun aux diverses lentilles et diaphragme est en principe l'axe optique. Mais l'œil n'est pas un système dont les dioptres sont alignés… Enfin, la fovéa occupe une position excentrée temporale par rapport à ce « meilleur axe moyen ». De ce fait, lorsqu'il fixe la mire centrale, l'œil est en légère rotation externe par rapport à celui-ci (Fig. 2.18c). Observé de manière coaxiale avec la mire de fixation centrale, le centre du reflet des mires (vertex) apparaît alors légèrement nasal vis-à-vis de la pupille et du centre géométrique de la cornée (Fig. 2.18d). L'axe vidéokératoscopique ne doit pas être confondu avec l'axe visuel ; la définition des principaux axes et angles oculaires fait l'objet du chapitre suivant.

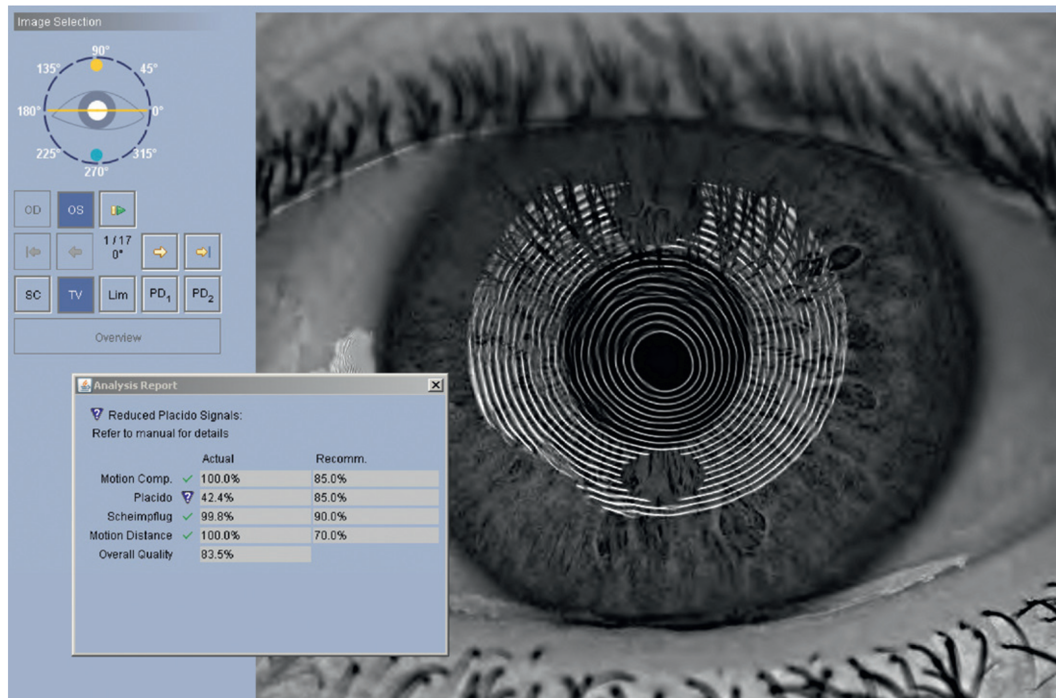



**Fig. 2.17.** ***Rapport d'analyse après acquisition de données Placido et d'élévation chez un patient atteint de kératocône : noter la déformation de l'image des mires réfléchies (topographe Galilei, Ziemer).***
*Un message d'alerte concernant la qualité de l'image Placido est émis par le logiciel. Noter l'absence de portions réfléchies et l'irrégularité de certaines des mires réfléchies.*

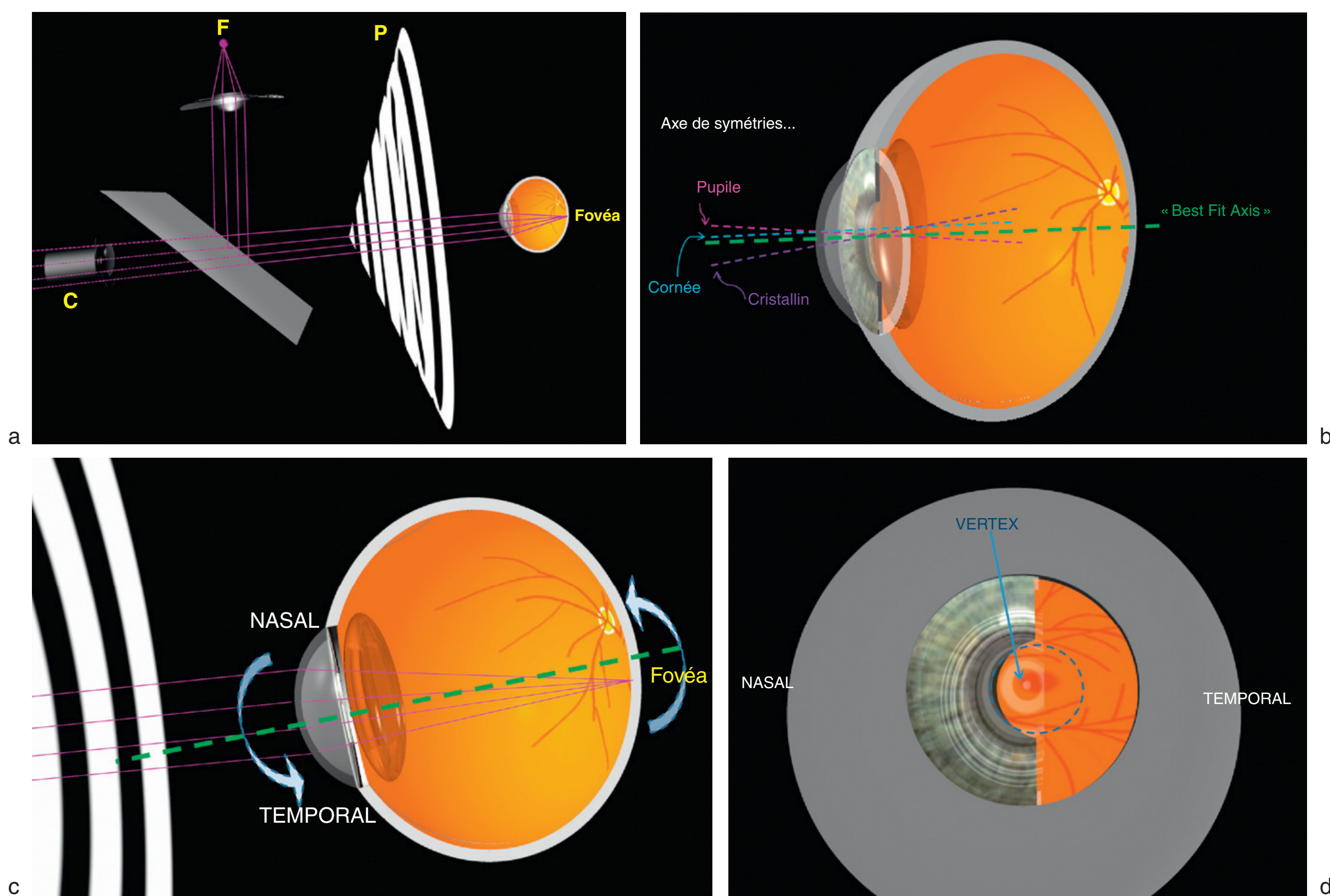



**Fig. 2.18.**
*a. Représentation schématique des positions respectives des principaux éléments d'une mesure vidéokératoscopique : dans cet exemple, la mire de fixation (F) est située optiquement « à l'infini ». Une fois l'œil aligné avec le topographe constitué d'un dispositif de Placido (P), l'utilisateur « met au point » sur la cornée de manière à ce que l'image enregistrée par la caméra (C) coaxiale soit « nette ». Dans cette situation, l'œil est en position de fixation fovéale : les rayons matérialisés ici sont ceux qui correspondent au trajet de la lumière de la source F (fixation) vers la fovéa de l'œil (les rayons issus de la réflexion du disque de Placido sur la cornée ne sont pas représentés). b. Représentation schématique des positions respectives des principaux axes de symétrie des principaux dioptres oculaires et de la pupille ; aucun de ces axes n'étant commun, on peut cependant définir un « axe médian moyen », ou* best fit axis, *qui serait équidistant de ces différents axes. c. La situation excentrique temporale de la fovéa peut être invoquée pour expliquer le fait que lorsque l'œil est en fixation, son « axe médian moyen » (ici en pointillés verts) est en rotation externe vis-à-vis de l'axe contenant le reflet cornéen du centre des mires (pour « aligner » la fovéa avec la pupille, la cornée nasale est alors « présentée » en regard du centre des mires). Pour la caméra, coaxiale avec le centre des mires, ce reflet apparaît en nasal de la cornée. d. Le reflet du centre du reflet des mires occupe la position dite du « vertex », généralement situé en nasal de la cornée et donc du disque pupillaire apparent (cercle pointillé). Cette position est variable pour un même patient, car elle dépend de diverses conditions liées à l'examen comme la distance de la mire de fixation (infini ou « finie » selon les topographes).*

## Références

[1] Brody J, Waller S, Wagoner M. Corneal topography : history, technique and clinical uses. Int Ophthalmol Clin 1994 ; 34 : 197–207.

[2] Klyce SD. Computer-assisted corneal topography. High-resolution graphic presentation and analysis of keratoscopy. Invest Ophthalmol Vis Sci 1984 ; 25 : 1426–35.

[3] Wilson SE, Klyce SD. Advances in the analysis of corneal topography. Surv Ophthalmol 1991 ; 35 : 269–77.

Chapitre 3

# *Principaux et axes angles utiles en topographie cornéenne*

*Axe kératométrique*

*Axe visuel, ligne de visée, axe pupillaire, angle kappa*

Les définitions précises des axes oculaires sont généralement jugées complexes et de peu d'importance pratique par le clinicien. Ils forment entre eux divers angles remarquables qu'il est toutefois important de connaître car il y est souvent fait référence dans les travaux de recherche clinique, et la description de procédures instrumentales à visée topographique. La littérature consacrée à ce sujet est essentiellement anglo-saxonne, et les termes utilisés dans la langue de Molière sont souvent « francisés » à partir des dénominations anglaises de référence, qui seront ainsi rappelées au besoin.

## Axe kératométrique

L'analyse de l'image réfléchie par la surface antérieure de la cornée du disque de Placido permet généralement de repérer la localisation du centre des mires concentrique (désigné comme le reflet central). L'image du reflet est capturée par une caméra qui est coaxiale avec la mire de Placido. Cette image réfléchie et virtuelle est située à 4 mm environ en arrière du vertex et correspond à la première image de Purkinje, dont la localisation dépend de l'orientation du dôme cornéen vis-à-vis du topographe, et donc de la position et de l'angulation globale de la cornée vis-à-vis de la coupole portant le motif de Placido (cette angulation est proportionnelle à l'angle kappa défini plus loin) [1] (Fig. 3.1).

Le point correspondant au reflet du centre des mires de Placido est appelé « reflet cornéen coaxial » (*coaxially sighted corneal reflex*). Il est facile à visualiser lors de l'examen vidéokératoscopique. Il permet de définir l'axe kératométrique, qui relie le centre des mires (avec lequel la caméra est coaxiale) et le centre de courbure local de la cornée, et contient la droite normale (perpendiculaire) à la surface de la cornée au point d'intersection. *Il ne correspond pas à un quelconque axe optique oculaire puisque produit par un simple phénomène de réflexion lumineuse.* En plus de changer selon la stratégie de fixation du patient, la position du reflet varie avec la distance (infinie ou rapprochée) de la mire de fixation utilisée pendant la mesure topographique. L'axe de cette mire de fixation (symbolisée par exemple par une maison ou une montgolfière au bout d'un chemin) est généralement confondu avec le centre de la mire de Placido : c'est le cas pour la majorité des topographes simples. Elle est le plus souvent virtuelle et située à l'infini, comme avec la plupart des instruments combinant topographe et aberromètre. De ce fait, les mouvements de translation de l'instrument effectués par l'utilisateur ne sollicitent pas la rotation du globe oculaire du patient (les rayons lumineux issus du point de fixation demeurent parallèles).

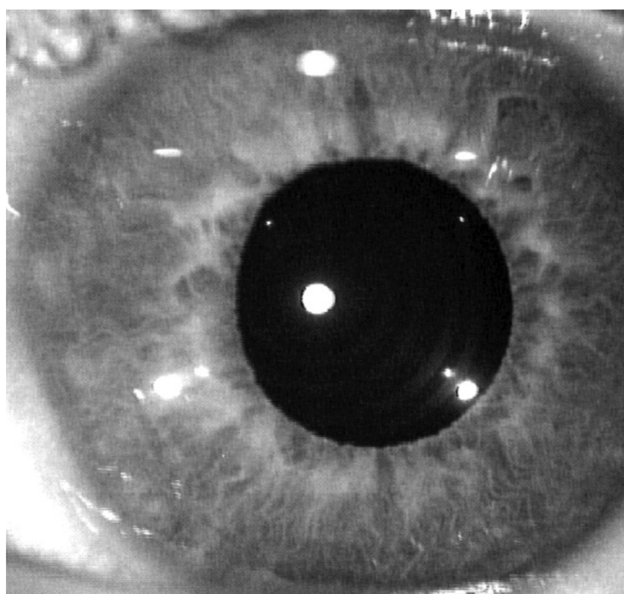


***Fig. 3.1.* Image du reflet cornéen central d'une mire de fixation (œil gauche).**
*Le déplacement en nasal du reflet central fixé pendant la mesure traduit l'existence d'un angle kappa important (10,27° sur l'hémi-méridien situé à 359,5°).*

### Conséquence clinique

Contrairement à une idée fausse, l'image du reflet central ne correspond pas à l'emplacement d'un « axe visuel » quelconque mais permet simplement de définir l'axe kératométrique, qui relie le point utilisé comme mire de fixation, et le centre de courbure local de la cornée. L'intersection de cet axe avec la cornée correspond au vertex cornéen, dont la localisation varie donc avec les conditions de mesures (Fig. 3.2 a et b). Ainsi, il n'y a pas de vertex « unique », et le vertex d'une mesure n'est pas forcément confondu avec l'apex (défini comme le point de courbure maximale). Le vertex varie chez un même patient selon que le topographe utilisé utilise une mire optiquement située à l'infini (œil en position de fixation primaire) ou rapprochée (œil en rotation pour maintenir l'image de la cible sur la fovéa).

En topographie spéculaire, le vertex sert généralement de point de centrage pour les cartes de courbure. Précisons que le centre utilisé pour la représentation en topographie d'élévation est différent : c'est le centre géométrique de l'ensemble des points mesurés de la surface cornéenne, également appelé « centroïde ».

## Axe visuel, ligne de visée, axe pupillaire, angle kappa

Quand le patient fixe une cible lumineuse ponctuelle (par exemple une cible optiquement située à l'infini au centre d'une mire de Placido), il en forme une image sur la fovéa, grâce à l'ensemble des rayons réfractés par la zone optique fonctionnelle de la cornée et propagés au travers de la pupille irienne. On peut tracer virtuellement une ligne qui relie la cible avec le centre de la pupille d'entrée : cette ligne est dénommée *line of sight* dans la littérature optométrique anglo-saxonne, terme que l'on pourrait traduire en français par « ligne de visée » (expression toutefois peu usitée en pratique, au profit de son équivalent anglais). Cette ligne matérialise le rayon principal (*chief ray*) émis par la cible fixée,

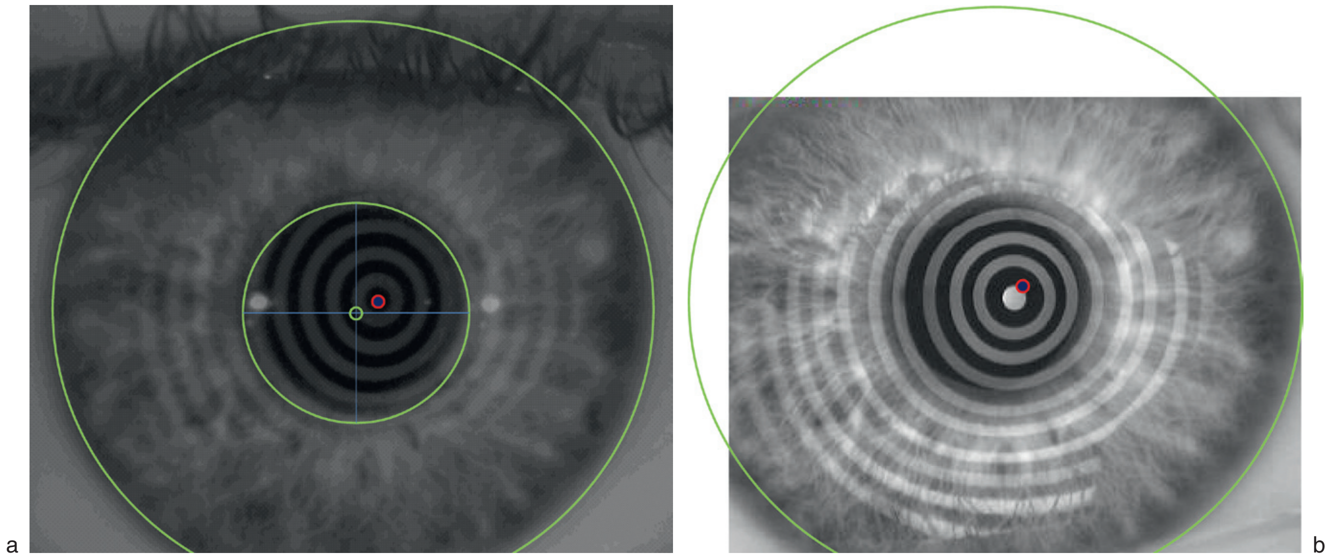



**Fig. 3.2. Localisation du vertex cornéen.**
*a. Le patient fixe avec son œil droit un point situé à quelques centimètres au centre de la coupole portant les mires de Placido (topographe Orbscan, Bausch and Lomb). Le premier reflet cornéen de ce point (surligné en rouge) est situé en nasal et en supérieur du centre de la pupille (surligné en vert). Il correspond à la projection du vertex pour cette mesure. b. Le même œil est cette fois-ci examiné avec un topographe ARK 10 000 (Nidek). Le patient fixe une mire virtuelle coaxiale avec le centre des mires de Placido, mais située à l'infini. On note que la localisation du vertex est ici légèrement différente; ceci est lié aux différences entre les topographes et la localisation du point de fixation utilisé pendant l'acquisition (le cercle rouge marque l'emplacement de la projection du vertex qui était obtenue avec le topographe Orsbcan).*

et dirigé vers le centre de la pupille d'entrée. Le point d'intersection de cette ligne avec la surface antérieure de la cornée est dénommé *corneal sighting center* ou *coaxially sighted entrance pupil center* (littéralement « centre de visée dans le plan cornéen » et « centre de la pupille coaxial dans le plan cornéen »). Ce point n'est ni confondu avec le centre géométrique de la cornée, ni avec l'apex cornéen. Sa détermination n'est pas aisée en clinique [1, 2]. Il correspond au centre de la zone optique cornéenne fonctionnelle (zone contenant les rayons lumineux réfractés par la cornée et qui contribuent à la formation de l'image fovéale). Il doit être distingué du point d'intersection entre la cornée et l'axe visuel.

Le déplacement du reflet du point de fixation avec le regard peut également servir à définir un autre axe important : l'axe pupillaire. L'axe pupillaire relie le centre de la pupille et le vertex correspondant, c'est-à-dire le point où la tangente à la surface cornéenne lui est perpendiculaire. Pour repérer l'intersection de la cornée avec l'axe pupillaire, il faut déplacer la cible de fixation, jusqu'à ce que ce que son reflet apparaisse pour un observateur (coaxial avec ce point) comme confondu avec le centre de la pupille. Lors d'un examen vidéotopographique, si le reflet du centre des mires de Placido est confondu avec le centre de la pupille, alors l'axe kératométrique et l'axe pupillaire sont confondus.

Le lecteur est en droit de s'interroger sur le pourquoi du choix de l'axe pupillaire comme axe principal de référence pour définir les angles visuels. Dans un système optique centré et symétrique muni de plusieurs lentilles, comme un objectif photographique, la ligne qui relie le centre du diaphragme avec le point central de la lentille frontale où la tangente en ce point

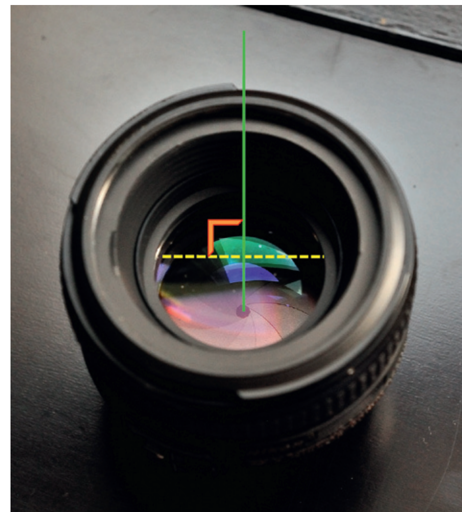


***Fig. 3.3.* Pour un système optique centré (ici un objectif photographique dont on distingue la « pupille d'entrée » délimitée par les lamelles du diaphragme), l'axe optique (en vert) passe par le sommet de la lentille frontale et est perpendiculaire à la tangente à cette lentille en ce point (ligne en pointillés jaunes).**
*Ces propriétés sont celles de l'axe pupillaire défini pour l'œil humain comme la ligne joignant le centre de la pupille et le point de la surface antérieure de la cornée, où la tangente qui y passe lui est perpendiculaire. Contrairement à cet objectif, le système « cornée – pupille – cristallin » dispose de lentilles non alignées et décentrées vis-à-vis de la pupille irienne. Ceci provoque le désaxage et l'apparition d'angles remarquables entre l'axe pupillaire, l'axe visuel, etc. En d'autres termes, le degré de « désaxage » des éléments optiques de l'œil est proportionnel à la déviation que ces axes forment avec l'axe pupillaire.*

lui est perpendiculaire, est confondue avec l'axe optique (Fig. 3.3). Il n'y a donc pas de déviation angulaire entre l'axe optique et les axes de symétrie des surfaces réfractives. L'œil est un système optique dont les

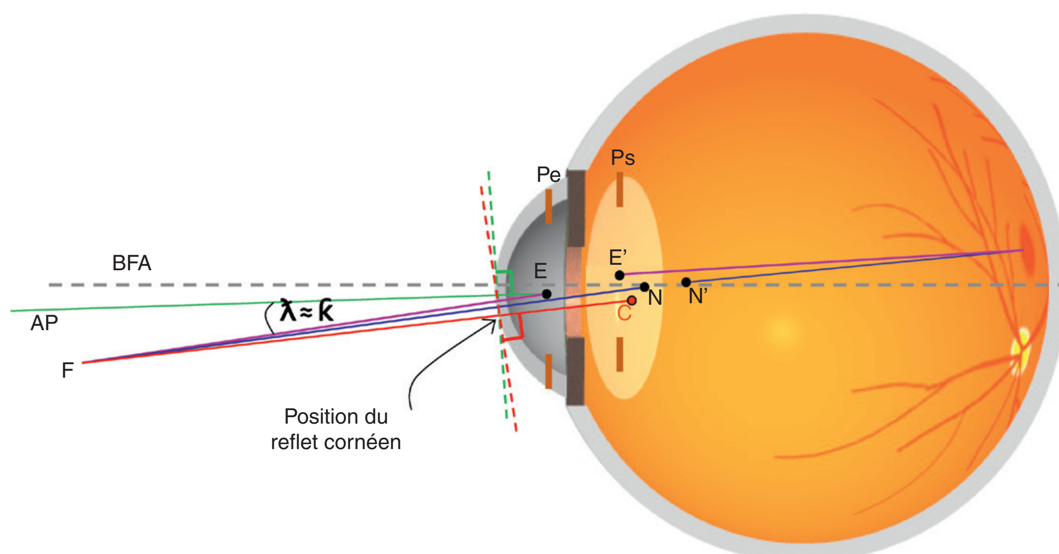



**Fig. 3.4.** ***Représentation schématique des principaux axes oculaires.***
*L'œil représenté en coupe schématique est un œil droit, coupé horizontalement. La partie supérieure du globe est enlevée (l'œil est vu par-dessus). La cornée, la pupille et le cristallin ne sont pas alignés sur un axe commun ; il est possible de définir un axe médian, ou* Best Fit Axis *(BFA), à partir des axes de symétrie respectifs de ces surfaces. Cet axe est parfois assimilé à l'« axe optique » de l'œil et est représenté en pointillés gris. F est le point cible fixé (ex : le point central des mires de Placido), dont l'image se forme sur la fovéa. Le point E se situe au centre de la pupille d'entrée (Pe), qui est l'image formée par la cornée de la pupille irienne. Le segment FE est le rayon central (*chief ray*) du bouquet de rayons qui contribue à la formation de l'image fovéale. Le point E' est au milieu de la pupille de sortie (Ps), qui est l'image formée par le cristallin de la pupille irienne. La ligne qui relie le point de fixation au centre de la pupille irienne est définie comme la ligne de visée (*line of sight*). Le reflet de F sur la cornée permet de définir l'axe kératométrique (en rouge). Cet axe contient le centre de courbure local de la cornée. L'axe visuel (en bleu) relie le point de fixation au premier point nodal, et le deuxième point nodal à la fovéa. Son intersection avec la cornée est appelée « pôle ophtalmométrique » (ophtamometric pole en anglais) : elle fournit le point de centrage idéal d'une procédure chirurgicale à visée réfractive sur la cornée. Les points nodaux d'un système optique sont deux points de l'axe optique notés N et N', conjugués l'un de l'autre, c'est-à-dire image l'une de l'autre, pour lesquels les angles d'inclinaison des rayons par rapport à l'axe médian, passant en N et sortant en N', sont identiques. Ce parallélisme résulte en l'absence d'aberration chromatique transverse le long de cet axe, où l'absence « d'effet prismatique » permet aux rayons de longueur d'ondes lumineuses différentes (couleurs diverses) de tous focaliser le long de ce même axe – parfois appelé « axe achromatique ». N' est appelé point nodal d'émergence. La distance focale de l'œil se mesure à partir de N' et est proche de 17 mm pour un œil emmétrope. L'axe pupillaire (en vert) correspond à la droite normale (perpendiculaire) à la surface cornéenne et passant par le centre de la pupille. L'axe pupillaire (AP) forme avec la ligne de visée l'angle kappa, et avec l'axe visuel l'angle lambda. En pratique, la proximité entre l'axe visuel et la ligne de visée permet de considérer ces angles comme équivalents.*

dioptres ne sont pas alignés, ce qui fait que l'on peut définir différents axes qui ne sont pas confondus et forment entre eux certains angles. L'axe pupillaire permet de définir certains de ces angles utiles à l'analyse de la position de l'œil au cours de la fixation, dont le plus important en clinique est l'angle kappa (Fig. 3.4).

L'angle kappa est défini classiquement comme l'angle formé entre l'axe pupillaire et l'axe visuel. L'axe visuel est défini selon des concepts optiques relativement complexes puisque l'œil est un système optique aux surfaces réfractives non centrées : il relie le point de fixation au premier point nodal (Fig. 3.4) [3]. La ligne de visée, *line of sight*, qui relie le centre de la pupille irienne avec le point de fixation, définit avec l'axe pupillaire l'angle lambda. En pratique, on peut considérer ces deux angles comme équivalents. Cependant, leur point d'intersection avec le dôme cornéen est distinct : « corneal sighting center » (centre de visée cornéen) pour la ligne de visée, « ophthalmometric pole » (pôle ophtalmométrique) pour l'axe visuel. En pratique, ces points sont très proches. L'axe visuel est indépendant du diamètre et de la position de la pupille, contrairement à la ligne de visée. En théorie, c'est sur le point d'intersection de l'axe visuel avec le dôme cornéen antérieur qu'il convient de centrer une procédure de chirurgie réfractive cornéenne [4]. Par définition, les rayons lumineux de différentes longueur d'onde émis par une source « à l'infini » qui passent par l'axe visuel ne sont pas déviés les uns par rapport aux autres. Cependant, le long de cet axe, les longueurs d'onde les plus courtes (bleu) sont réfractées en avant des plus longues (rouge) : on parle d'aberration chromatique longitudinale (environ 2 Dioptries en moyenne entre le rouge et le bleu). Il n'y a en revanche pas d'aberration chromatique transverse le long de cet axe. Une procédure chirurgicale cornéenne ou interne résultant en une petite zone optique fonctionnelle (ex : implant intra cornéen) doit idéalement être centrée sur cet axe (sur le pôle ophtalmométrique en cas de chiurgie cornéenne) sous peine d'accroître le taux d'aberration chromatique transverse et réduire fortement la qualité optique de l'œil opéré. Il est difficile de matérialiser l'emplacement de ces points (pôle ophtamométrique, centre de visée cornéen), mais ils sont en moyenne plus proche de l'emplacement du reflet cornéen de la source observée et situé « à l'infini » que du centre de la pupille.

L'angle kappa peut être compris comme le degré d'angulation global de l'œil quand il fixe une cible, en raison de la position excentrique de la fovéa vis-à-vis du centre géométrique de la rétine. Plus l'œil est court, plus l'œil présente généralement un angle kappa élevé (Fig. 3.5a et b). Dans ce cas, la direction nasale du reflet cornéen est accentuée.

L'angle lambda (équivalent à l'angle kappa en pratique) diminue après la naissance, d'une valeur moyenne de

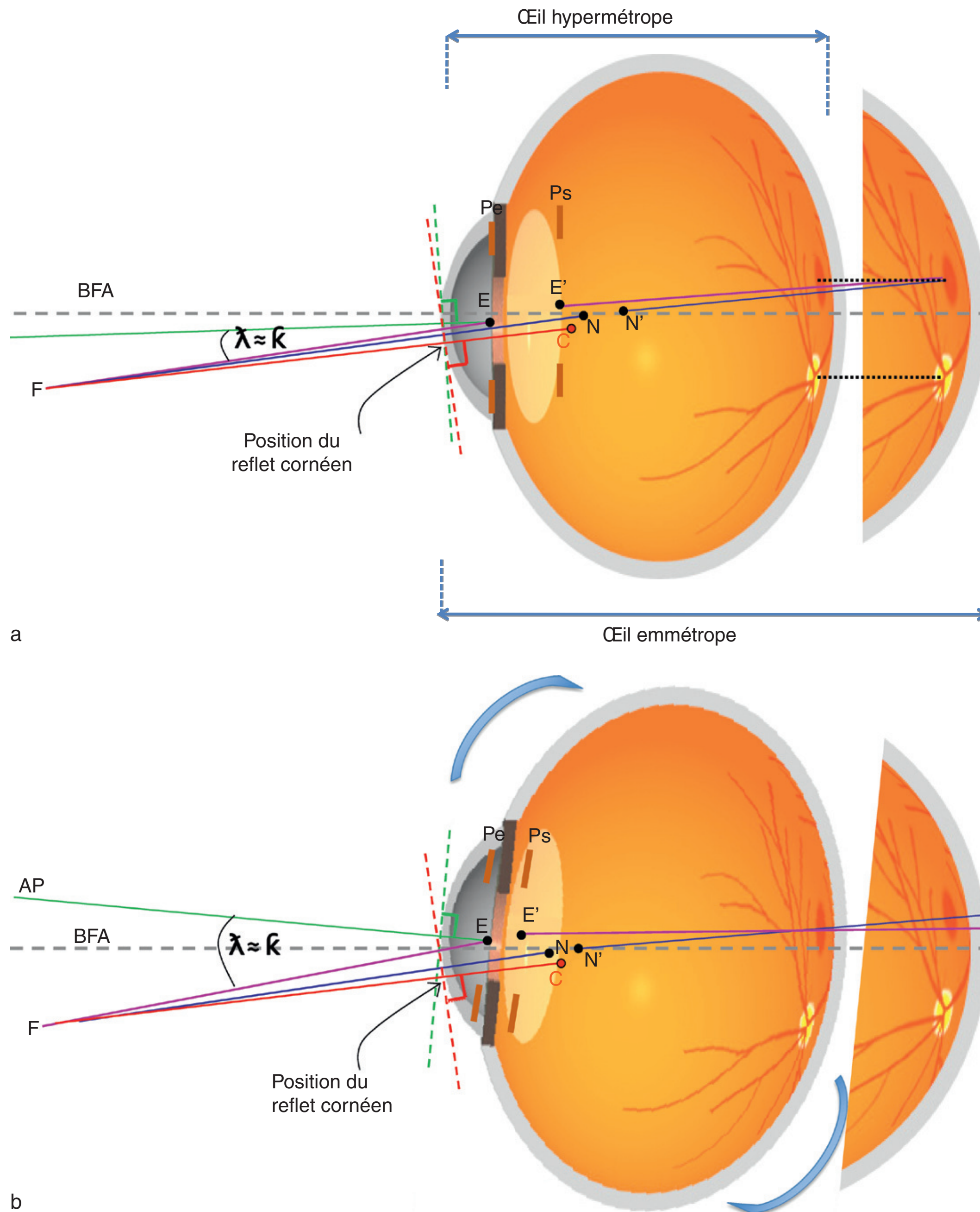



***Fig. 3.5. Angle kappa selon la longueur de l'œil.***
*a. Un œil hypermétrope présente une longueur axiale réduite vis-à-vis d'un œil emmétrope. Cependant, la distance entre le nerf optique et la macula est relativement constante pour des yeux dont la longueur axiale diffère. La géométrie de la figure révèle que si la longueur axiale est raccourcie mais la distance interpapillo-maculaire (correspondant à l'écart entre les traits en pointillés noirs sur le schéma) est constante, la fovéa occupe alors une position proportionnellement plus excentrique à celle d'un œil de longueur axiale supérieure (l'axe visuel, en bleu, de l'œil emmétrope passe à sa partie nasale). b. Pour un œil hypermétrope (raccourcissement de la longueur axiale), une stratégie de fixation impliquant une légère « rotation » externe du globe (exotorsion) permet une meilleure orientation de la fovéa avec le point de fixation. Cet alignement aboutit à une augmentation des angles λ et κ (représentés ici pour l'œil hypermétrope). Du fait de ce positionnement avec légère angulation/rotation externe, le reflet cornéen de la cible fixée pour un observateur coaxial se localise plus en nasal de la cornée. Ceci tend à rapprocher le point d'intersection de l'axe visuel (en bleu) avec la position plus nasale du reflet cornéen.*

8° à une valeur généralement comprise entre 5 et 6° vers l'âge de 3 ans, et reste stable ensuite [5].

L'estimation de l'angle kappa est fournie par certains topographes d'élévation à partir de la mesure du plan irien, de l'ouverture pupillaire et de la position du vertex. Il est difficile d'établir une concordance exacte de cet angle avec le « véritable » angle kappa (malaisé à mesurer en clinique par impossibilité de repérage précis de l'axe visuel). Cette valeur est toutefois utile pour apprécier le degré de rotation du globe pendant la mesure. La rotation est généralement temporale, ce qui déplace le reflet du centre des mires (vertex) en nasal de la pupille. Cela peut affecter le rendu de certaines cartes comme celle de la pachymétrie optique et d'élévation (Fig. 3.6). La carte de courbure axiale (Placido) est toujours centrée sur le vertex, ce qui explique qu'un « sablier » topographique (cornée torique) demeurera au centre de la carte quel que soit l'angle kappa.

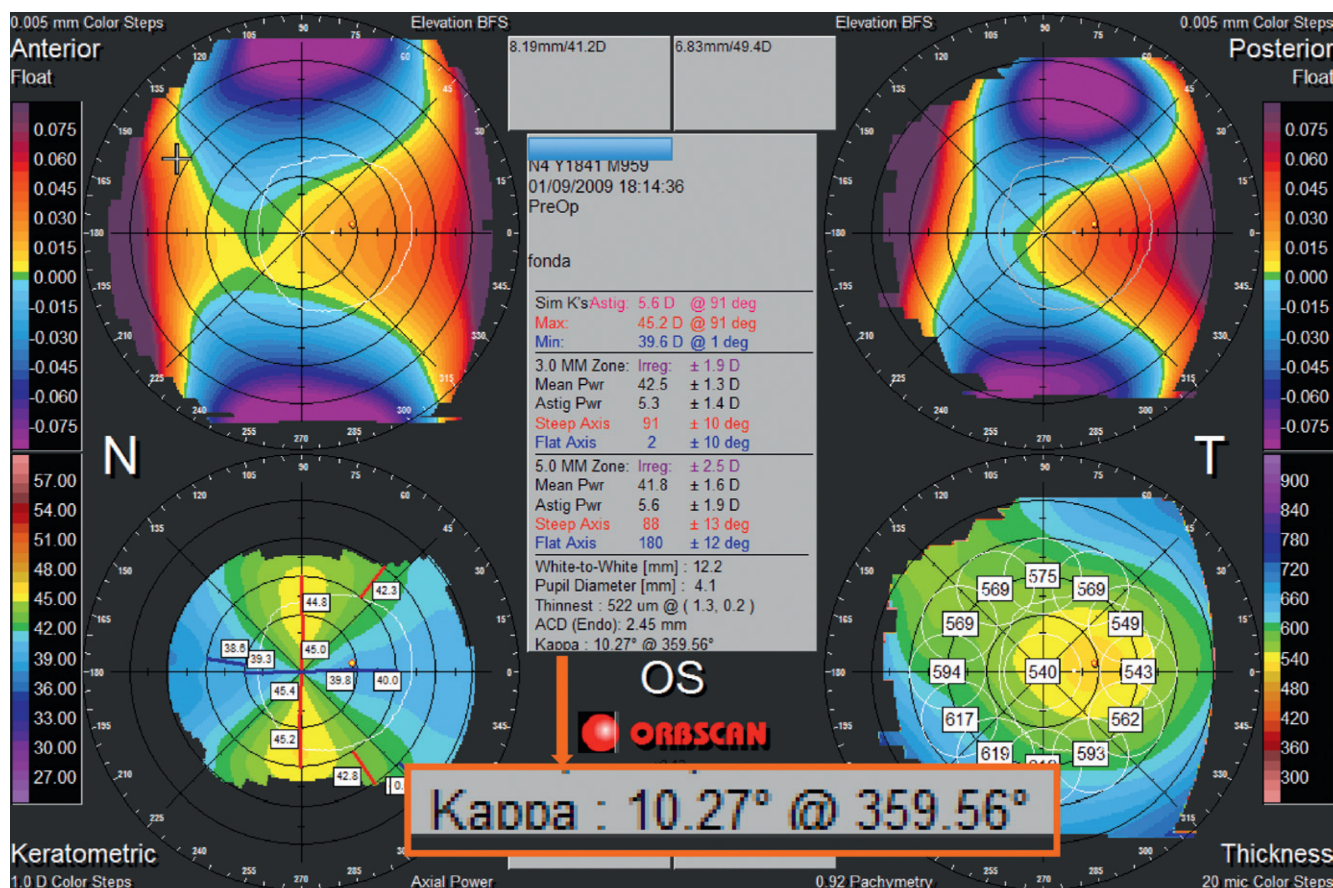



**Fig. 3.6.** *Carte topographique d'élévation et de courbure (Orbscan mode* **Quad Map***) de la cornée d'un l'œil gauche hypermétrope et fortement astigmate dont la position du reflet cornéen est montrée à la Fig. 3.1.*
*L'angle kappa est estimé à plus de 10°, et cette orientation explique le score élevé d'irrégularité, ainsi que le déplacement en temporal de la zone physiologique d'amincissement cornéen central. Les yeux fortement astigmates présentent souvent un angle kappa important.*

## Conséquences cliniques

– L'axe pupillaire matérialise une position de référence pour laquelle le segment antérieur de l'œil ne présenterait pas d'angle significatif avec la cible fixée, comme dans le cas d'un objectif d'appareil photo.

– L'interprétation des cartes topographiques doit tenir compte d'un angle kappa particulièrement large (supérieur à 7°) : le « désaxage » relatif de la cornée peut induire un pattern asymétrique (Fig. 3.5).

– Un angle kappa plus prononcé est souvent observé chez les patients hypermétropes. Chez l'enfant, un angle lambda particulièrement prononcé doit faire rechercher l'existence d'un strabisme.

– Le calcul des aberrations cornéennes doit tenir compte de l'angle kappa (ou lambda), et devrait être centré (pour posséder une valeur clinique prédictive pour la qualité de l'image fovéale) sur l'intersection entre l'axe visuel et le dôme cornéen antérieur, voire le centre de visée cornéen plutôt que le vertex.

– En chirurgie réfractive cornéenne, l'intersection entre l'axe visuel et le dôme cornéen définit un repère idéal pour le centrage. Sa localisation est difficile à effectuer avec les méthodes courantes, mais elle se situe généralement entre la projection du centre de la pupille et le reflet cornéen coaxial de la cible visée.

### Références

[1] Mandell RB, Chiang CS, Klein SA. Location of the major corneal reference points. Optom Vis Sci 1995 ; 72 (11) : 776–84.
[2] Braaf B, van de Watering TC, Spruijt K, van der Heijde RG, Sicam VA. Calculating Angle Lambda (λ) Using Zernike Tilt Measurements in Specular Reflection Corneal Topography. J Optom 2009 ; 2 : 207–14.
[3] Atchinson DA, Smith G. Axes of the eye. In : Optics of the human eye. Woburn, MA : Butterworth-Heinemann, Elsevier ; 2000. p. 30–8.
[4] Pande M, Hillman JS. Optical zone centration in keratorefractive surgery. Ophthalmology 1993 ; 100 : 1230–7.
[5] Riddell PM, Hainline L, Abramov I. Calibration of the Hirschberg test in human infants. Invest Ophthalmol Vis Sci 1994 ; 35 : 538–43.

Chapitre 4

# Principes des cartes topographiques de courbure

Les cartes de courbure ont été les premières cartes disponibles pour les cliniciens. Elles ont été élaborées à partir de l'analyse informatisée de l'image spéculaire (c'est-à-dire de réflexion) d'un disque de Placido sur la surface antérieure de la cornée.

La cornée agit comme un miroir convexe et l'image réfléchie des mires de Placido (qui était visualisée directement avec les techniques de kératoscopie), est alors capturée par une caméra numérique, puis analysée par un logiciel dédié.

# Qu'est-ce que la courbure ?

Intuitivement, la courbure s'oppose à la « droiture », ou à la « platitude ». La courbure désigne en effet la quantité dont un objet géométrique dévie d'un plan (objet tridimensionnel) ou d'une ligne droite (courbe bidimensionnelle).

On dit communément que la courbure possède « un rayon », dont la longueur permet de quantifier la courbure. Mais comment est défini ce rayon ?

Pour aborder la notion de rayon de courbure, il est plus commode de débuter par le cas simple d'une structure bidimensionnelle (par exemple, une « ligne courbe » tracée dans le plan de cette page ou courbe plane), que par celui d'une structure tridimensionnelle (par exemple, la surface courbe formée par un dos de cuiller).

## Courbure d'une ligne courbe (espace à deux dimensions)

La courbure d'une ligne courbe est définie comme celle du cercle qui touche de près la courbe au point d'intérêt. Il s'agit du cercle « tangent » à la courbe plane au point considéré, encore appelé cercle osculateur, du latin *osculare*, embrasser. Le rayon de courbure d'une courbe en un point donné est simplement le rayon du cercle osculateur au niveau de ce point (Fig. 4.1). La courbure indique la propension locale de la courbe à se comporter comme un cercle de plus ou moins grand rayon.

Le cercle est une courbe remarquable, dont la courbure est en tout point égale; le cercle osculateur à un cercle en tout point est ce cercle lui-même! Plus le cercle est petit, plus sa courbure plus élevée. De fait, plus le rayon de courbure est court, plus la courbure est forte, et inversement. La longueur du rayon du cercle osculateur est inversement proportionnelle à la valeur de la courbure. Une ligne droite possède une courbure dont le rayon local est partout infini.

### Conséquence topographique

Quel que soit le méridien considéré, le profil cornéen n'est pas parfaitement circulaire. De ce fait, la courbure d'un méridien n'est pas constante en tout point. Toutefois, on peut considérer qu'en chaque point de la courbe formée par le méridien, il existe un cercle qui l'épouse « au mieux ». La courbure est une notion « locale », qui dépend de l'endroit où on la mesure. Dans le cas d'une ligne courbe tracée dans un espace plat, il n'existe qu'un seul rayon de courbure pour chacun de ses points. La représentation de grandeurs liées à ces rayons est l'objet de la topographie de courbure. Cette représentation peut être directe (longueur rayon de courbure en mm) ou indirecte (courbure en dioptries).

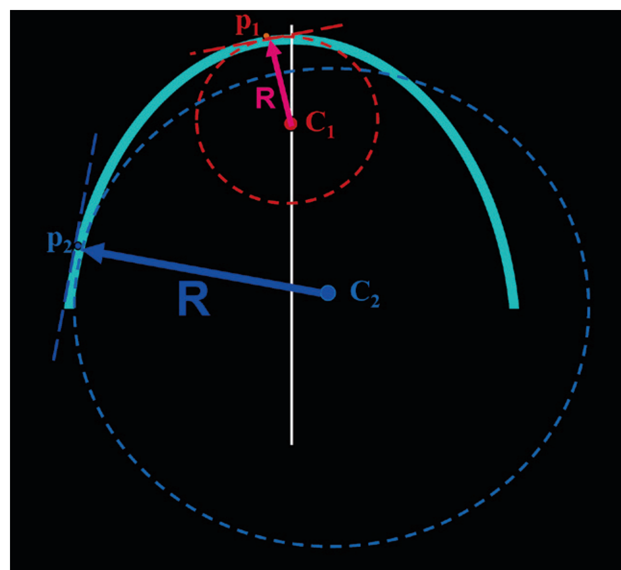



**Fig. 4.1.** ***La courbure en un point d'une courbe (ici en bleu clair) est inversement proportionnelle au rayon du cercle qui « épouse » la courbe au point considéré : le cercle osculateur*** **(lat. osculatus : caressé).**
*La courbure en $p_1$ et en $p_2$ est égale à l'inverse du rayon des cercles tangents à ces deux points (respectivement centrés en $C_1$ et en $C_2$). Si cette courbe représentait un méridien cornéen, la courbure étudiée ici correspondrait à la courbure dite « tangentielle » (ou instantanée).*

## Courbure d'une surface (espace à trois dimensions)

Par extension avec la courbure d'une courbe (rayon du cercle osculateur), la courbure d'une surface courbe déployée dans un espace tridimensionnel est définie par le rayon de courbure de la sphère osculatrice au point considéré de cette surface (Fig. 4.2). En topographie cornéenne, cette approche n'est pas ou peu utilisée à des fins cliniques, sauf dans le mode dit « courbure moyenne ».

Les modes habituels de représentation en courbure (ex : mode axial, mode tangentiel) correspondent plutôt à la représentation de la courbure locale de courbes engendrées par *l'intersection de la surface cornéenne avec un plan de coupe dont la direction est prédéfinie.*

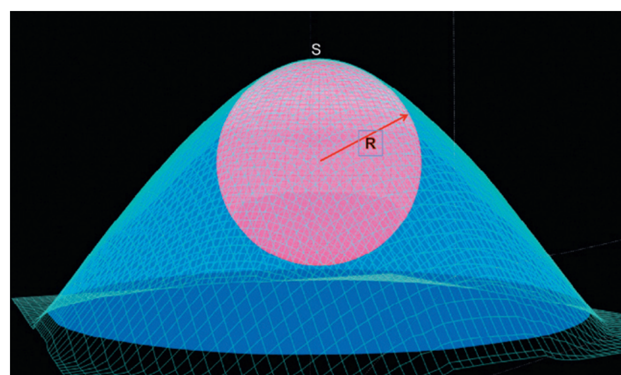



***Fig. 4.2. Courbure d'une surface dans un espace à trois dimensions : la courbure est donnée en chaque point par le rayon R de la sphère osculatrice.***
*La sphère osculatrice au sommet de la surface bleue est représentée ici en rose. Le rayon de courbure apical est donc celui de la sphère osculatrice au sommet S.*

De ce fait, la courbure locale des surfaces bidimensionnelles courbées dans un espace tridimensionnel (tel que la surface cornéenne) peut être mesurée le long d'un plan quelconque, à condition que celui-ci soit perpendiculaire à la surface au point d'intérêt. Ces plans se recoupent tous selon la direction dite « normale » (perpendiculaire) à la surface au point considéré.

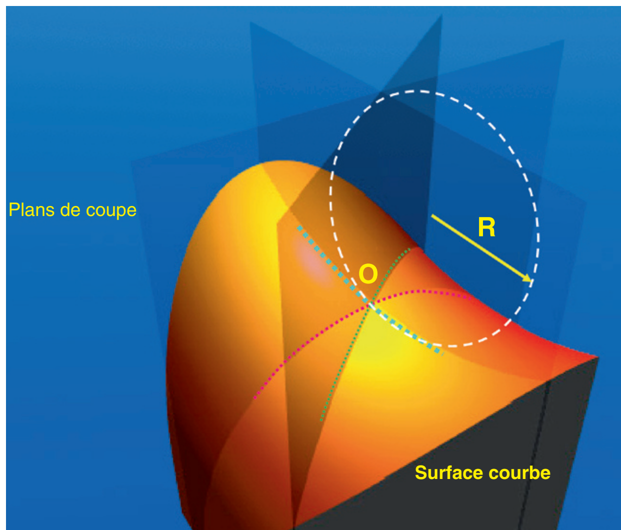



**Fig. 4.3. *En tout point O d'une surface courbe non sphérique, la courbure varie selon la direction de coupe.***
*Il existe au point O considéré une infinité de courbures, dont les valeurs sont comprises entre celles des courbures extrêmes. Les deux courbures extrêmes en chaque point sont sur des directions de coupes perpendiculaires. Les directions de coupe extrêmes sont surlignées en bleu et rouge au niveau de leur intersection avec la surface mesurée. Une direction de courbure intermédiaire a été représentée avec son plan de coupe et soulignée en pointillés verts au niveau de l'intersection avec la surface. La courbure correspond à l'inverse du rayon du cercle osculateur situé dans le plan de la direction considérée pour sa mesure (représenté ici pour la courbure explorée dans le plan de coupe souligné en bleu).*

La courbure peut varier en fonction de la direction du méridien contenu par le plan perpendiculaire le long duquel elle est mesurée (Fig. 4.3). Ce n'est que dans le cas d'une sphère que le rayon de courbure est égal au rayon d'une sphère en tout point de la surface sphérique, et ce quelle que soit la direction du plan de coupe (Fig. 4.4).

Par conséquent, pour déterminer la courbure d'une surface tridimensionnelle qui n'est pas sphérique, comme une cornée, des plans de mesure doivent être choisis. Ces plans coupent la surface au point de mesure ; l'intersection de chaque plan avec la courbe est une courbe : on est alors ramené à l'étude de la courbure d'une ligne courbe. Rappelons qu'une moyenne effectuée entre des mesures de courbure réalisées le long des plans de coupe fournirait une valeur moyenne pour la courbure locale d'une surface. La courbure moyenne en un point d'une surface correspond par exemple à la moyenne (arithmétique ou géométrique) entre les valeurs minimale et maximale mesurées en ce point ; elle se rapproche de la véritable définition mathématique de la courbure d'une surface tridimensionnelle (le rayon moyen est proche de celui de la sphère osculatrice). Cette approche est toutefois peu usitée en clinique ; la courbure de la surface est mesurée le long de directions particulières.

## Application topographique

La notion de choix de direction de mesure est importante pour comprendre les différences entre les représentations en modes de courbure dite « axiale (ou sagittale) » et « tangentielle (ou instantanée) », et leurs limites respectives [1]. La Fig. 4.5 montre un exemple de carte en mode tangentiel : un méridien horizontal (choisi arbitrairement) a été souligné en bleu. Les chiffres en mm se rapportent à la valeur du rayon de courbure local, c'est-à-dire à des points mesurés arbitrairement.

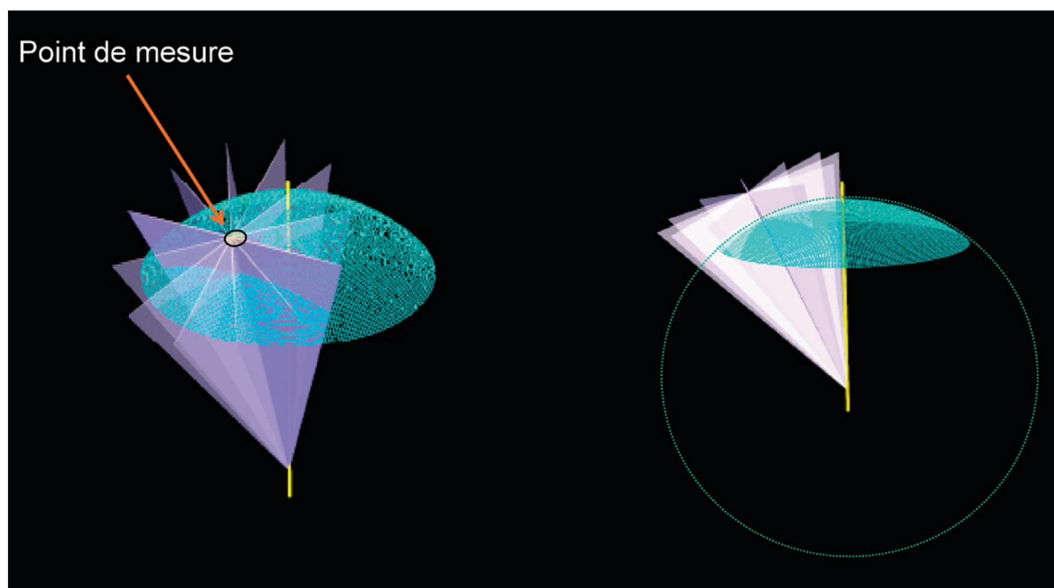



**Fig. 4.4. *Une calotte parfaitement sphérique est représentée en bleu de ¾ et de profil.***
*Quelle que soit la direction de mesure de la courbure en un point donné, celle-ci est constante ; et égale à celle de la sphère. Ceci est vrai pour tous les points de la calotte sphérique.*

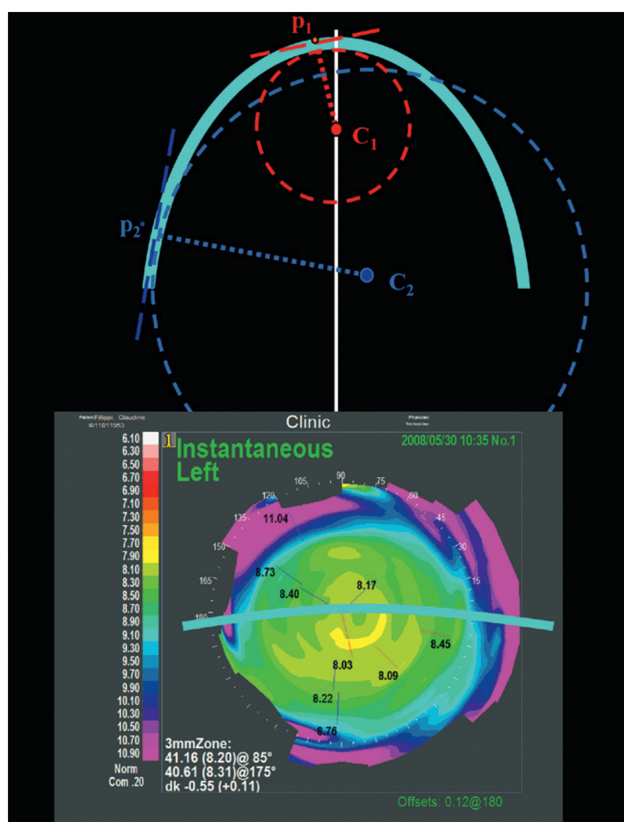



**Fig. 4.5.** *La courbure instantanée ou tangentielle explore la courbure le long des méridiens, dans une direction «radiaire», qui va du vertex vers la périphérie.*

## Rendu des cartes de courbure

À chaque fois que l'on interprète une carte de courbure (axiale, tangentielle ou moyenne), il faut impérativement garder à l'esprit que l'on regarde en fait des «rayons de courbure». Les cartes en échelle millimétrique sont ainsi conçues pour et attribuent en général une couleur d'autant plus chaude que les rayons de courbure mesurés sont petits. L'utilisation de cartes en rayon de courbure est naturellement préférée en contactologie, quand il s'agit de guider le choix du rayon d'une lentille d'essai.

Quand l'échelle d'une carte de courbure est en dioptries, il faut bien garder à l'esprit qu'il s'agit de «dioptries de courbures», et non de dioptries de puissance optique. Ces dioptries sont calculées comme l'inverse du rayon de courbure (exprimé en mètres) multiplié par la différence entre l'indice kératométrique (égal à 1,33) et l'indice de l'air (égal à 1). Au voisinage du sommet de la cornée (et seulement à cet endroit), les dioptries de courbure sont égales aux dioptries de puissance optique, à condition de mesurer une cornée «standard», dont on présume que la cornée postérieure à une courbure proportionnelle à la cornée antérieure; en moyenne, la face postérieure réduit la puissance optique de la cornée antérieure d'environ 10 % (ceci est lié au gradient d'indice de réfraction négatif entre humeur aqueuse et stroma cornéen). L'indice kératométrique est un indice minoré (l'indice de réfraction physique réel du stroma cornéen est proche de 1,376). Ce choix est destiné à compenser l'absence de mesure de la face postérieure de la cornée : en effet, quand on utilise la valeur n = 1,33 au lieu de n = 1,376, on obtient une puissance optique réduite d'environ 10 %.

On peut légitimement s'interroger quant au choix d'un indice minoré, destiné à rendre plus réaliste un calcul de puissance optique, pour le calcul du rendu de cartes de courbure. Cette généralisation remonte à une époque où il n'existait pas de méthode clinique simple pour mesurer la courbure de la face postérieure de la cornée (et donc d'en calculer la puissance optique). Le lecteur est invité à s'accoutumer à ce fait mais à rester attentif à ceci : les cartes axiales ou instantanées légendées en dioptries sont des cartes de courbure, et non de puissance optique. Ce point est développé dans le chapitre 5.

Ainsi, pour une carte de courbure, une zone représentée par des couleurs «chaudes» est simplement une zone où la courbure est plus importante (les rayons de courbure y sont plus petits). Inversement, une zone de couleurs plus froides est une zone où la courbure est moindre (les rayons de courbure sont plus grands).

Une erreur fréquente consiste à extrapoler la représentation tridimensionnelle de la cornée à partir des informations de courbure; visualiser les zones rouges comme des sommets ou des bosses, et les zones bleues comme des creux ou des vallées conduit à une interprétation erronée. Il est naturel d'appréhender une carte topographique ainsi : en effet, le propre de la topographie est de représenter une «forme», et non des données de courbures. Mais l'histoire de l'exploration cornéenne veut que la topographie «de courbure» ait précédé la topographie d'élévation, et instauré un code de représentation colorimétrique emprunté à la topographie terrestre, ou les couleurs chaudes correspondent à des zones «plus élevées», et non «plus courbées». Ainsi, les cartes de courbures ne montrent que… la courbure.

Avant de s'attarder sur les différences entre mode «axial» et mode «tangentiel», il est utile de rappeler les points suivants :

– bien que le calcul de la courbure d'une surface continue puisse être réalisé de manière analytique à partir des données d'élévation (forme), cela nécessiterait une précision extrême dans la zone centrale de la cornée où de toutes petites différences d'élévation de l'ordre du micron peuvent correspondre à des variations de courbure significatives (Fig. 4.6). L'algorithme utilisé pour le calcul de la courbure à partir de l'image numérisée du reflet du disque de Placido doit également extrapoler la valeur de la courbure au centre de la carte à partir des données calculées à sa proximité immédiate;

– si le processus mathématique utilisé pour la détection de l'image informatisée des disques de Placido conduit au calcul du rayon de courbure local (unité de distance, par exemple le mm), la représentation des cartes topographiques utilise souvent les dioptries. On utilise pour cela une formule paraxiale pour les cartes axiales et tangentielles. La valeur dioptrique de courbure est alors calculée comme l'inverse du rayon de

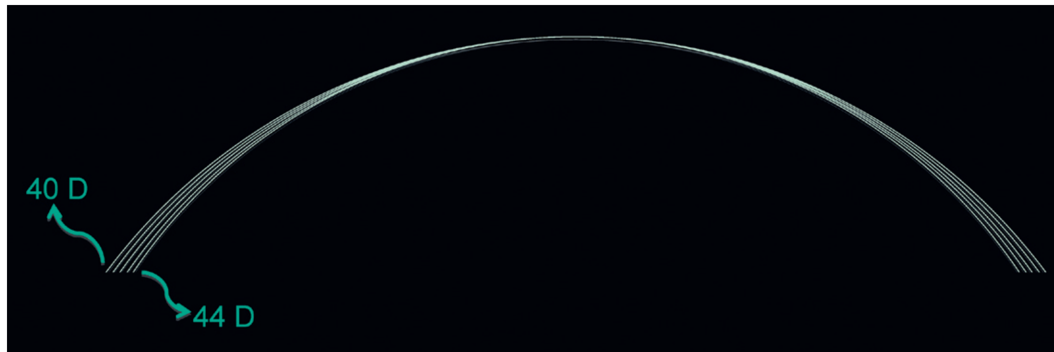
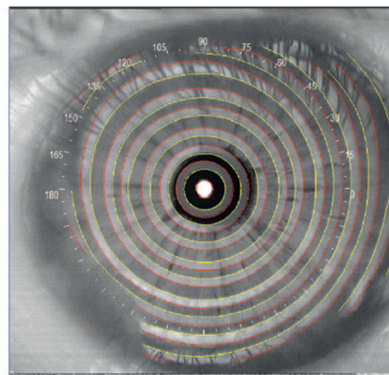
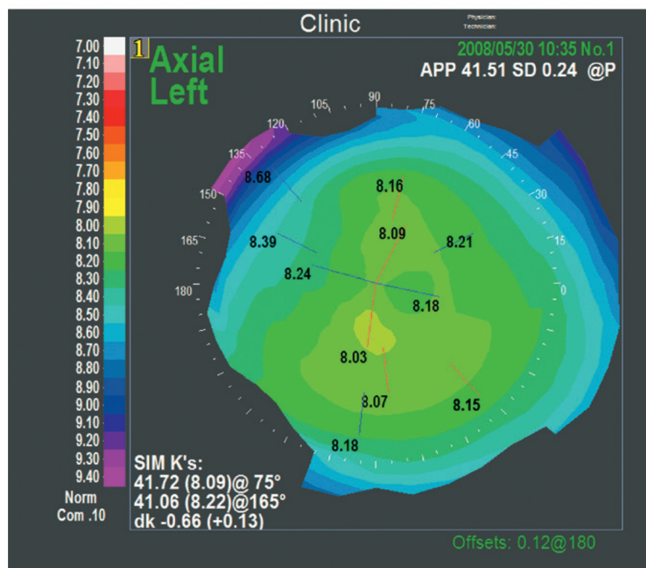



**Fig. 4.6. *Représentation à l'échelle de différents profils cornéens circulaires, correspondant du plus externe au plus interne aux valeurs kératométriques suivantes : 40 D, 41 D, 42 D, 43 D, 44 D.***
*Noter la superposition des profils dans la zone apicale. L'espacement maximal entre ces profils est de l'ordre du micron dans la région centrale de diamètre 1 mm ! Cette particularité explique que les topographes d'élévation sont parfois moins sensibles pour la représentation de la courbure centrale, où la proximité spatiale de ces profils exige une précision qui peut dépasser celle de ces instruments.*





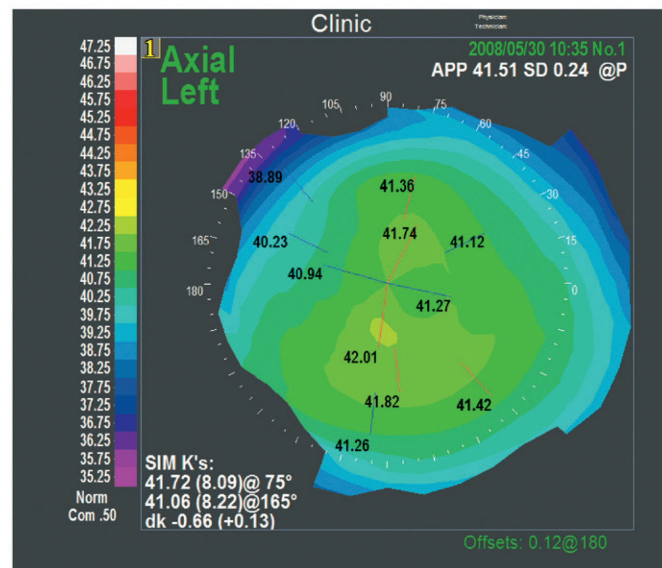




**Fig. 4.7. *Cartes topographiques d'une même surface antérieure cornéenne établie en mode axial à partir de l'image en réflexion des mires de Placido, l'une en dioptries, l'autre en mm.***
*La courbure est exprimée en mm (à gauche) avec un pas d'échelle de 0,10 mm et convertie en dioptries de courbure (à droite), en utilisant une valeur de l'indice de réfraction de 1,337 pour la cornée (pas d'échelle : 0,50 D).*

courbure, multiplié par la différence d'indice de réfraction entre celui de l'air et celui choisi pour le milieu cornéen. Cette information ne doit pas être considérée comme décrivant la vraie puissance optique de la cornée en dehors de la zone centrale (proche de l'axe optique de la cornée). Ce point est très important, car même si l'on utilise une unité commune (dioptries), il ne faut pas confondre courbure et pouvoir optique, et distinguer des dioptries « de courbures » des dioptries de pouvoir optique. La Fig. 4.7 montre un exemple de cartes en mm et en dioptries, représentant la même information de courbure axiale. Certains instruments

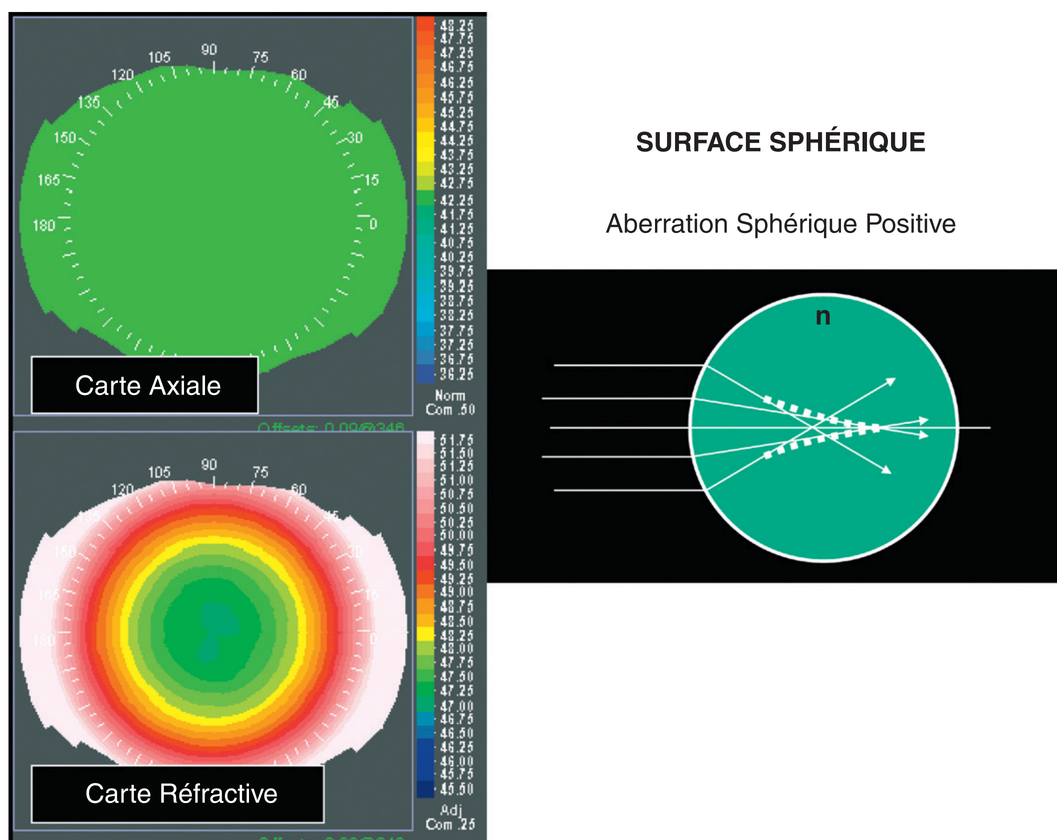



**Fig. 4.8.** ***Représentation d'une surface sphérique en plastique calibrée (rayon de courbure constant = 8 mm).*** *La courbure axiale est constante sur toute la surface (8 mm/42,25 D avec n = 1,337). La carte réfractive est calculée selon les lois de l'optique géométrique, et tient compte de l'angle d'incidence des rayons parallèles rencontrant la surface. Cela se traduit par une augmentation de la puissance optique du centre vers les bords de la surface (le « vrai » indice de réfraction utilisé pour les calculs est n = 1,374). Les couleurs chaudes sont utilisées pour signaler les zones avec une puissance optique accrue. La perte du stigmatisme qui résulterait de la réfraction par une telle surface est appelée aberration sphérique : les rayons réfractés loin de l'axe optique sont plus réfractés que les rayons dits « paraxiaux » (proches de l'axe).*

utilisent la dénomination *axial power* pour désigner les cartes de courbure axiale (ex : Orbscan). L'expression power se réfère dans ce contexte à l'utilisation des Dioptries pour exprimer des données de courbure (la puissance optique est alors dénommée *Optical power*) ;

– les cartes en mode « puissance réfractive », ou « pouvoir optique » de la surface antérieure de la cornée sont destinées à représenter non pas la courbure mais le pouvoir optique local de la cornée. Pour réaliser ces cartes, il faut utiliser la valeur de la courbure locale, la valeur physique « réelle » de l'indice de réfraction stromal, et tenir compte de l'angle d'incidence des rayons lumineux sur la surface cornéenne. Ces rayons sont supposés émis par une source ponctuelle éloignée, et sont parallèles quand ils rencontrent la surface de la cornée. Du fait de la courbure de celle-ci, cet angle d'incidence varie du centre vers sa périphérie. L'angle réfracté, calculé selon les lois de Snell, varie donc également. Pour chaque rayon incident, il est possible de calculer la distance à laquelle le rayon réfracté rencontre l'axe optique de la cornée antérieure. La puissance optique (en dioptries) est égale à l'inverse de cette distance exprimé en mètres. Le mode de carte en « puissance réfractive », calculé à partir du recueil de la courbure, fournit une estimation des propriétés optiques de la cornée antérieure. La Fig. 4.8 fournit un exemple de carte de puissance réfractive calculée à partir de la mesure topographique d'une surface sphérique (de courbure constante). Ce mode fait l'objet d'un chapitre spécifique.

## Courbure axiale, courbure tangentielle

Comme souligné plus haut, des plans d'intersection sont utilisés afin de déterminer la courbure d'une surface tridimensionnelle, telle que la cornée [2–4].

Ce problème ne se poserait pas si la surface cornéenne était parfaitement sphérique. La sphère est une surface particulière dont le rayon de courbure en tout point est identique quelle que soir la direction de mesure (*cf.* Fig. 4.4).

En revanche, pour une surface non sphérique comme un ellipsoïde, le rayon de courbure des points en dehors du sommet dépend non seulement de leur distance à ce sommet, mais aussi de la direction dans laquelle on va mesurer la courbure en ces points (Fig. 4.9).

La courbure tangentielle (ou instantanée, ce terme reflétant le caractère « local » et non moyenné de la mesure, ou encore méridionale, car reflétant la direction de mesure) est mesurée en un point le long de l'hémiméridien qui s'étend du vertex à ce point.

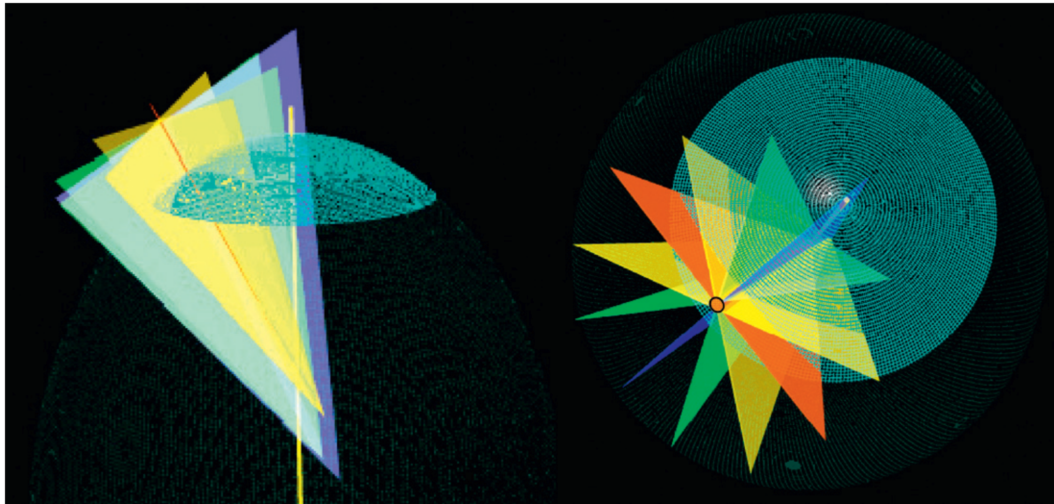


***Fig. 4.9.*** ***En un point quelconque d'une surface asphérique (en dehors du sommet), la courbure mesurée dans un plan perpendiculaire varie avec la direction de coupe de celui-ci.***
*Sur ce schéma, la surface dont on mesure la courbure est une calotte d'ellipsoïde (représentée par un maillage turquoise clair). Les plans de coupe sont représentés par des surfaces triangulaires, dont la plus grande longueur correspond schématiquement au rayon de courbure local inversement proportionnelle à la valeur de la courbure mesurée le long de ceux-ci. Dans cet exemple, le plan coloré en rouge correspond à la direction de mesure où la courbure est maximale, le bleu celui où la courbure est minimale.*

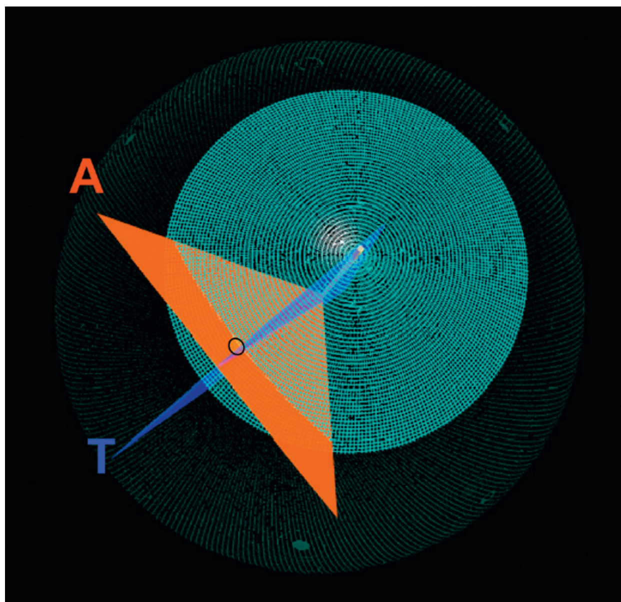



***Fig. 4.10.*** ***La courbure tangentielle (ou instantanée) est mesurée le long du méridien tangentiel, qui s'étend du vertex au point de mesure; sa direction correspond au plan de coupe bleu dans cet exemple (calotte d'ellipsoïde).***
*La courbure sagittale (ou axiale) est mesurée le long du méridien sagittal, qui est par définition perpendiculaire au méridien tangentiel au point de mesure. Sur une surface « régulière » comme cette calotte d'ellipsoïde, ces directions sont toujours celles qui portent les valeurs de courbures extrémales (minimums ou maximums). Les algorithmes de calcul de courbure des topographes reposent sur cette propriété. La surface cornéenne présente constamment à un degré variable une certaine asymétrie. De ce fait, les directions porteuses des courbures extrémales peuvent s'éloigner des directions respectives axiales et tangentielles. En pratique, pour des surfaces cornéennes « normales », ceci n'a que peut de conséquences, mais en cas de distorsion importante (ex : kératocône), cela peut se traduire par des différences importantes au niveau des cartes tangentielles (instantanées) et axiales (sagittales).*

La courbure sagittale (ou axiale) est mesurée le long du méridien qui est perpendiculaire au méridien tangentiel au point de mesure (Fig. 4.10).

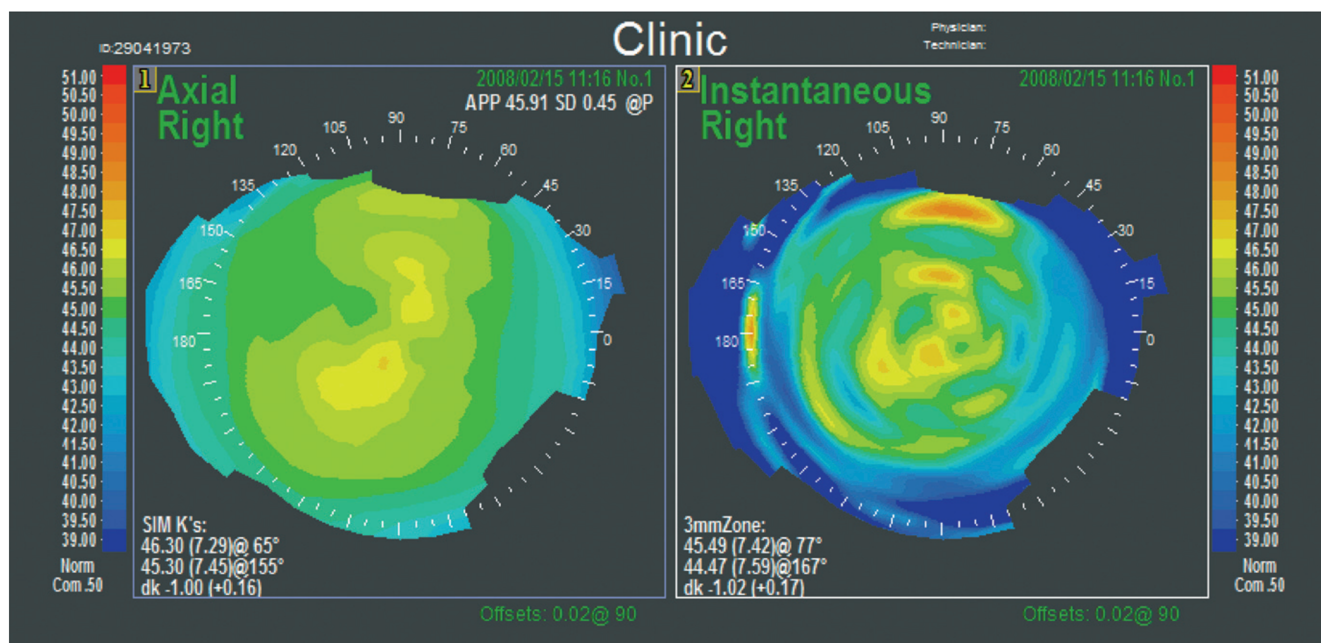
Les Fig. 4.11 et 4.12 fournissent une représentation comparée des courbures instantanée et axiale de la même cornée.

Nous avons utilisé une approche purement géométrique pour introduire ces notions, mais il est possible de recourir à une approche analytique pour les calculer et montrer que la valeur de la courbure axiale en un point donné est égale à la moyenne des valeurs de courbure tangentielle pour l'ensemble des points situés entre le sommet cornéen et ce point (pour une surface cornéenne qui serait parfaitement ellipsoïdale). Ceci corrobore l'aspect plus « lissé » des cartes en mode axial.

Dans le cas de surfaces théoriques correspondant par exemple à de purs ellipsoïdes, les directions axiales et tangentielles sont celles des courbures extrêmes locales (maximale et minimale) au point d'intérêt. Toujours dans le cas d'un ellipsoïde, la courbure axiale et la courbure tangentielle tendent à croître ou décroître du sommet vers périphérie, selon le type d'asphéricité de l'ellipsoïde. Toute mesure effectuée dans un plan intermédiaire sera comprise entre les valeurs axiales et tangentielles. L'origine des rayons de courbure du mode axial est située sur l'axe central de révolution de l'ellipsoïde.

L'algorithme sagittal ou tangentiel utilisé pour représenter les cartes de courbure de surfaces cornéennes « réelles » dans les modes correspondants est aussi fondé sur cette hypothèse. Lorsque la cornée est normale ou ne manifeste pas de déformation importante, les données sagittales et tangentielles apparaissent différentes, même si les informations fournies ne sont pas contradictoires mais plutôt complémentaires. Cette différence s'accentue quand la cornée mesurée s'éloigne du modèle ellipsoïdal (ex : kératocône).

***Fig. 4.11. Exemple de représentation de la courbure en mode axial (à gauche) et en mode tangentiel (à droite).***
*Au milieu, la représentation des directions de mesure pour ces cartes. À chaque point de la surface analysée, la courbure instantanée (ou tangentielle) est mesurée le long du méridien tangentiel, qui s'étend le long de la surface mesurée à partir du vertex (cette direction est ici surlignée en rose), et la courbure axiale (ou sagittale) est mesurée le long du méridien sagittal, qui est perpendiculaire au méridien tangentiel au point d'intérêt (la direction est ici surlignée en bleu). Les cercles « osculateurs » dont la courbure donne celle mesurée en un point arbitraire donné (ici en jaune) ont également été représentés.*



### Conséquence clinique

Compte tenu de sa sensibilité aux variations de courbure le long d'axes localement perpendiculaires du méridien contenant le point de mesure, le mode sagittal (axial) est particulièrement indiqué pour l'étude de l'astigmatisme cornéen, en particulier dans la région apicale ou paracentrale.

Le mode tangentiel (instantané) permet en particulier d'explorer la variation de la courbure cornéenne du sommet vers les bords, dans l'axe des méridiens. Il fournit une évaluation directe du type d'asphéricité de la surface antérieure de la cornée (Fig. 4.11 et 4.12), ce qui peut être utile pour le choix du dégagement périphérique d'une lentille rigide.

Après chirurgie réfractive photoablative, les variations rapides de la courbure engendrées par le raccord d'une zone optique à visée démyopisante avec la périphérie cornéenne sont mieux visualisées en mode tangentiel (instantané), car celui-ci explore naturellement les variations de courbures dans une direction radiaire (du centre vers les bords), soit la même direction que celle qui définit l'asphéricité des méridiens de la cornée (Fig. 4.13). En présence d'une cornée fortement asphérique, les différences entre les valeurs de kératométrie axiale et tangentielle sont marquées en périphérie (Fig. 4.14a et b). Les différences entre les modes axial et tangentiel expliquent qu'il est préférable de choisir la courbure dioptrique moyenne à 4 mm du vertex sur les cartes axiales, et à seulement 2 mm sur les cartes tangentielles [5] pour extrapoler la valeur de la courbure centrale moyenne de la cornée.

Quand la cornée présente des déformations asymétriques importantes (exemple : kératocône), les directions des courbures axiales et tangentielles centrées sur le vertex ne sont plus forcément celles où la courbure est localement maximale. Ceci explique les discordances accrues entre cartes axiales et tangentielles.

## Courbure moyenne, courbure gaussienne

Au sens mathématique, le mode de « courbure moyenne » correspond à la représentation la plus juste des variations de la courbure de la surface cornéenne.

Cette courbure moyenne correspond à la moyenne *arithmétique* entre la courbure minimale et de la courbure maximale au point d'intérêt. Contrairement aux modes axial et instantané, la représentation de la courbure moyenne est relativement indépendante de la direction de mesure de la courbure (Fig. 4.15). Pour pouvoir être calculée avec précision, le calcul de la courbure moyenne nécessite idéalement l'acquisition indépendante préalable de données d'élévation (c'est-à-dire de données de forme), notamment pour les cornées fortement déformées.

La courbure gaussienne correspond à la moyenne *géométrique* de la courbure minimale et de la courbure maximale (c'est la racine carrée du produit de ces courbures). Comme la courbure dite moyenne, elle est indépendante de la direction de mesure de la courbure.

Les cartes de courbure moyenne (arithmétique ou géométrique) permettent d'apprécier la répartition spatiale globale de la courbure cornéenne ou de détecter d'éventuelles fluctuations locales.

Dans le cas de cornées affectées de déformation asymétrique ou irrégulière (kératocône avancé, cicatrices cornéennes, etc.), les courbures minimale et maximale locales, bien que toujours mutuellement perpendiculaires, peuvent ne pas être situées dans ces directions prédéfinies, tangentielle et axiale. Dans certaines circonstances cliniques, des divergences importantes sont ainsi observées entre certaines caractéristiques des cartes axiales et sagittales puisque les algorithmes de calcul supposent que les courbures extrêmes sont situées le long de directions fixes. Par exemple, le point de courbure axiale maximale (apex en courbure axiale) est souvent localisé différemment du point de courbure tangentielle maximale (apex en courbure tangentielle) pour les courbures.

L'inspection des cartes axiales, tangentielles, de courbure moyenne d'une même cornée révèle généralement que l'apex cornéen (zone de cambrure maximale) varie pour chacune d'entre elles, mais que les localisations fournies par les modes tangentiel et courbure moyenne sont plus proches entre elles que celle obtenue par le mode axial (Fig. 4.16). La localisation précise de l'apex d'un cône doit être effectuée dans le mode de courbure moyenne, mais tous les topographes ne la proposent pas. La carte tangentielle (instantanée) est alors la plus indiquée pour repérer l'apex. Ceci est particulièrement intéressant en contactologie. La précision du mode tangentiel (instantané) n'est toutefois pas garantie pour les cornées atteintes d'un kératocône très évolué [6].

Compte tenu de leur caractère « moyenné », les cartes de courbure moyenne masquent les directions des axes principaux de courbure (minimale et maximale), mais certains modes permettent leur représentation sous forme de flèches vectorielles en surimpression (Fig. 4.17 et 4.18). Quand la cornée présente une faible toricité (symétrie de révolution), il y a peu de discordance entre les cartes de courbure axiale, tangentielle et moyenne (Fig. 4.19).

◀ ◗ ***Fig. 4.12.*** ***Autre exemple de représentation en modes axial et instantané (ou tangentiel) d'une même surface cornéenne antérieure.*** *La direction des méridiens les plus cambrés (astigmatisme cornéen direct, axe du méridien le plus cambré situé à 80°) est mieux visualisée en mode axial. Ici, le mode tangentiel révèle mieux les fines fluctuations locales de courbure, et le caractère globalement prolate (aplatissement périphérique, cambrure centrale) de cette cornée. Il est intéressant de noter les différences (légères) des valeurs de la kératométrie simulée (Sim-K's) entre les modes axial et tangentiel.*

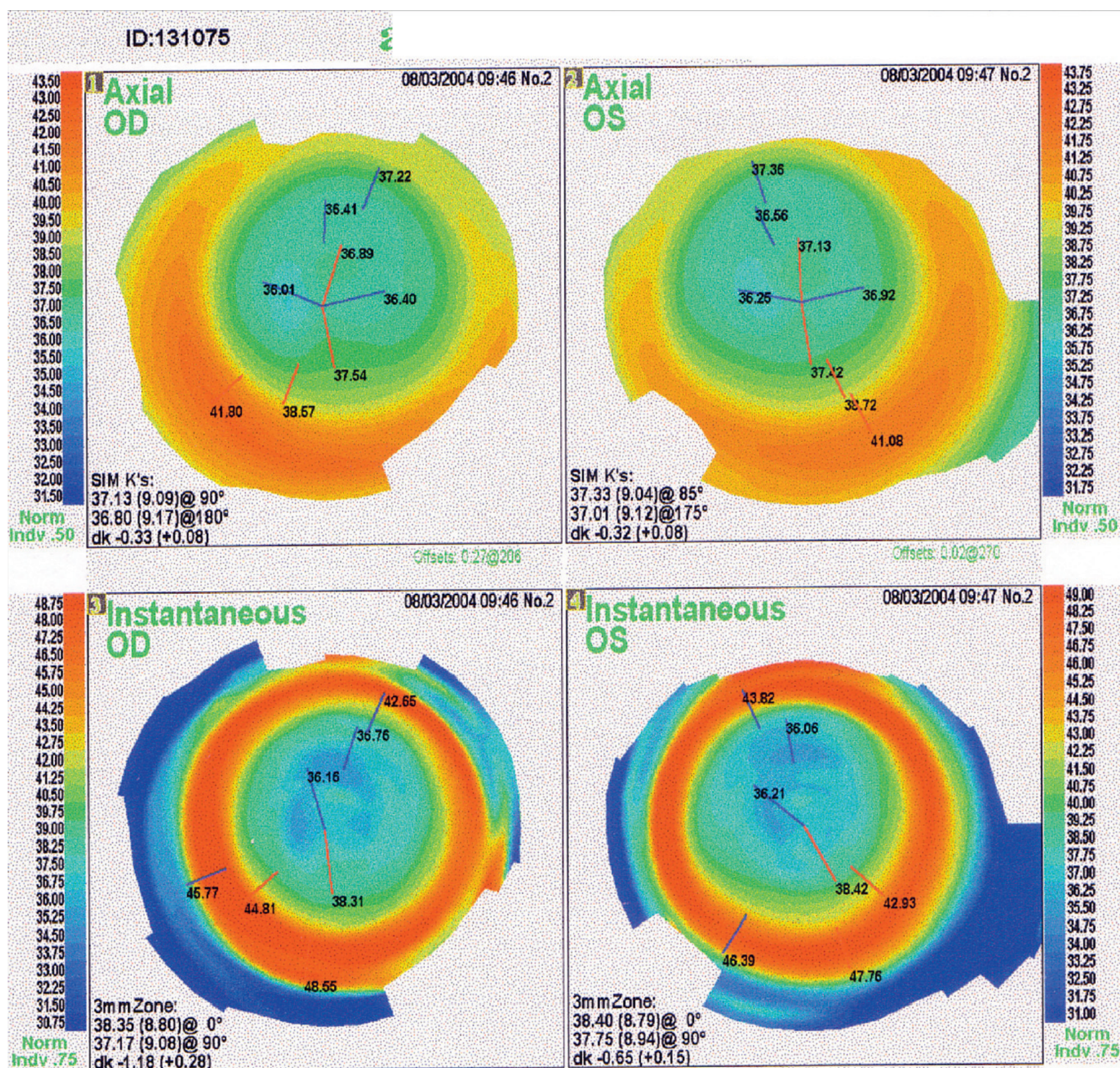
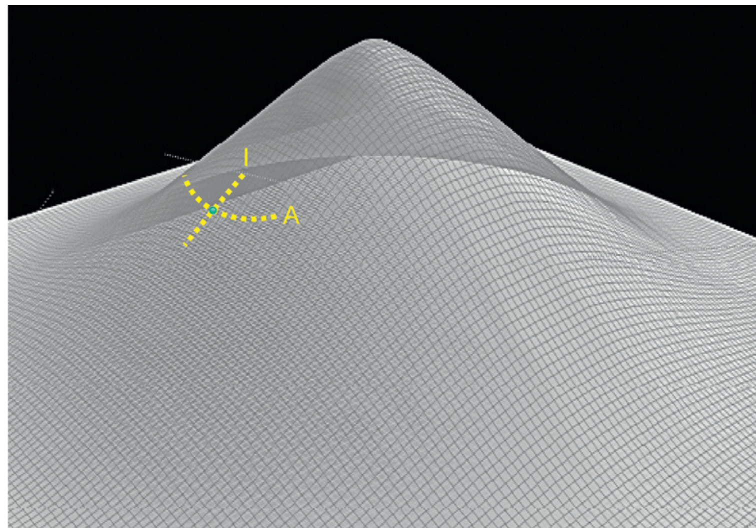



**Fig. 4.13.** ***Tracés des courbures axiales et instantanées des yeux droit et gauche d'un patient après Lasik (*****Laser in situ Keratomileusis*****) myopique.***
*Compte tenu de sa sensibilité aux variations de courbure le long d'un méridien, le mode axial est particulièrement indiqué pour l'étude de l'astigmatisme cornéen dans la région apicale (astigmatisme direct dans cet exemple). Le mode instantané permet en particulier d'explorer la variation de la courbure cornéenne du centre vers les bords. Le « cercle rouge » correspond à la zone annulaire de courbure plus élevée à la jonction des zones traitée et non traitée. Il est plus défini au niveau de la carte en mode instantané.*

Logiquement, le point où la courbure globale est la plus importante (apex) est souvent proche du point d'élévation maximale (Fig. 4.20). Pour les yeux atteints de kératocône ou de dégénérescence marginale pellucide (DMP), l'apex (zone de cambrure maximale) est proche — mais pas forcément confondu — avec la zone d'élévation maximale.

## Conséquence clinique

Le repérage de l'apex (zone de cambrure maximale) doit idéalement s'effectuer sur une carte représentant la courbure moyenne, ou à défaut sur une carte de courbure tangentielle (instantanée).



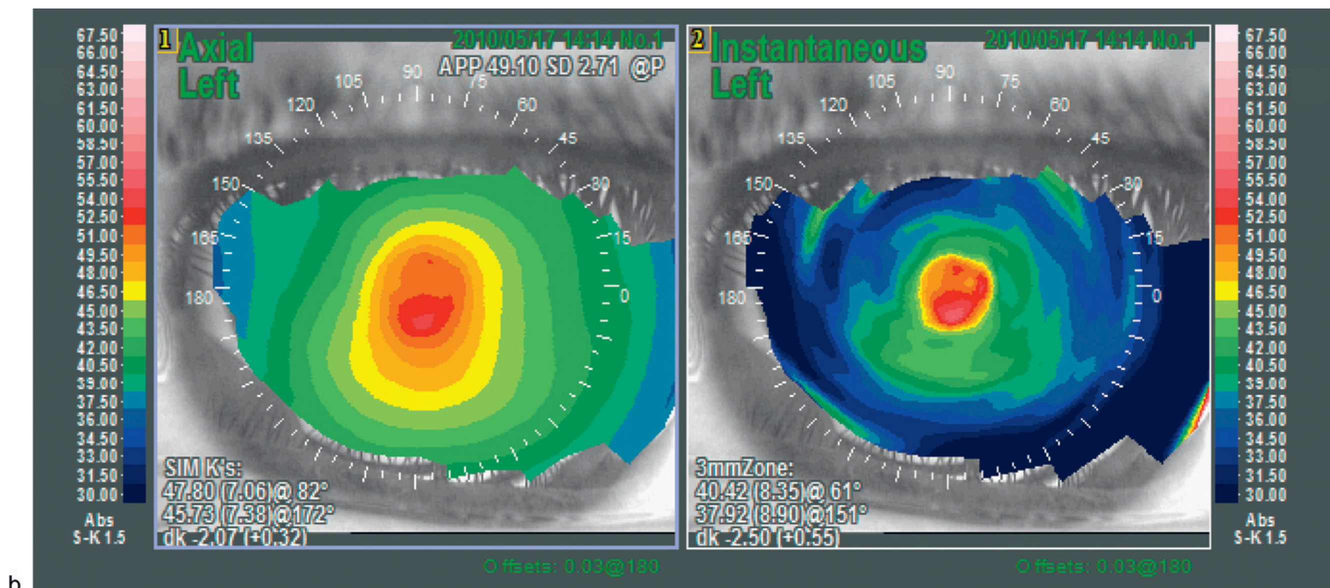




**Fig. 4.14.**

*a. Représentation schématique d'une surface asphérique prolate (la courbure décroît rapidement du sommet vers les bords), et de la courbure locale en un point le long des directions instantanées (I) et axiale (A). La courbure est plus prononcée dans la direction axiale, et ce d'autant plus que le point de mesure se situe à distance du sommet.*

*b. Représentation de la kératométrie (courbure axiale à gauche et instantanée à droite) d'un kératocône dont l'apex est proche du centre géométrique de la cornée. Ces cartes sont une illustration clinique des différences entre courbure axiale et instantanée : en moyenne et extrême périphérie, la courbure instantanée est nettement inférieure à la courbure axiale, comme le révèle le refroidissement rapide des couleurs à mesure que l'on s'éloigne du sommet (l'échelle est identique pour les deux cartes).*

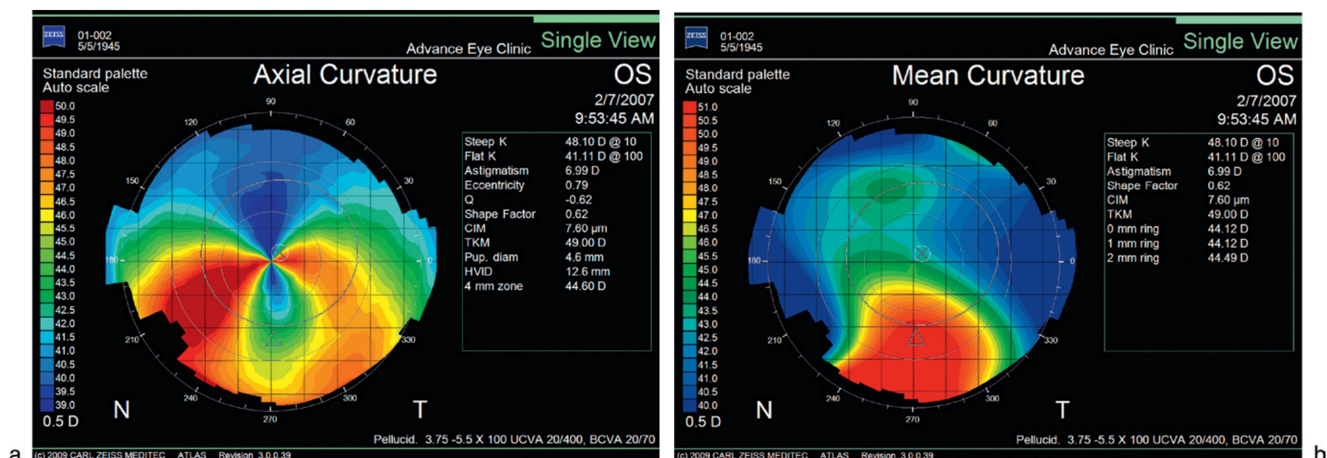



**Fig. 4.15.** *Cornée atteinte de dégénérescence pellucide marginale.*
*a. Représentation en mode axial. On note une importante toricité, les méridiens horizontaux étant globalement plus cambrés que les méridiens verticaux. Il existe une asymétrie importante, les hémiméridiens supérieurs sont globalement moins cambrés que les hémiméridiens inférieurs. Ceci est responsable de la déformation du sablier horizontal, dont les branches sont « inclinées » vers le bas. Le mode axial est particulièrement sensible aux variations de courbure entre les méridiens, et souligne la toricité cornéenne centrale, dont l'orientation est superposable avec celle de l'astigmatisme réfractif. Il est moins sensible à la variation de courbure le long de chaque méridien.*
*b. Même surface cornéenne représentée en mode « courbure moyenne »* (mean curvature). *Ce mode permet de représenter les variations de courbure locale, sans parti pris vis-à-vis de la direction de mesure de celle-ci. Ce mode confirme que la partie inférieure de la surface cornéenne est globalement plus cambrée que la partie supérieure. L'apex (zone de courbure maximale) apparaît situé en paracentral intérieur ; ceci peut s'avérer utile pour guider l'adaptation d'une lentille de contact rigide.*

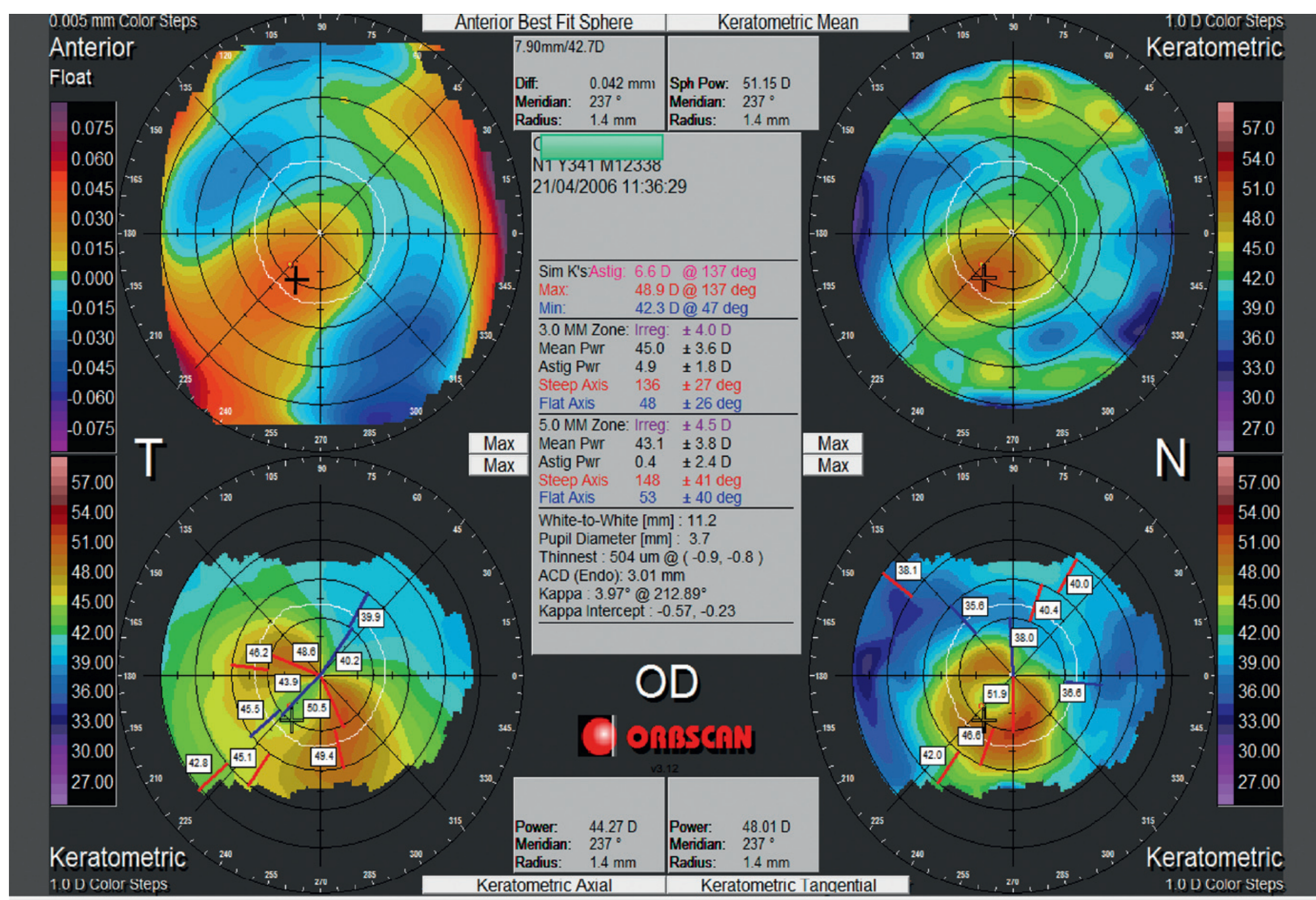



**Fig. 4.16.** ***Comparaison entre trois modes de représentation en courbure d'une surface cornéenne antérieure présentant un kératocône.***
*L'élévation vis-à-vis d'une sphère de référence est également représentée en haut à gauche. La croix a été positionnée sur le point où la courbure moyenne* (keratometric mean, *en haut à droite) est maximale (51,15 D). Ce point est situé à 1,4 mm du centre géométrique de la cornée, sur l'hémiméridien dont l'axe est 237°. Sur la carte d'élévation antérieure vis-à-vis d'une sphère de référence flottante (rayon = 7,90), ce point apparaît situé sur une zone d'élévation marquée (42 µm au-dessus de la sphère). Sur les cartes de courbure axiale et tangentielle, il ne correspond pas aux zones les plus cambrées, mais s'en éloigne moins sur la carte tangentielle où il apparaît généralement décalé en inférieur.*

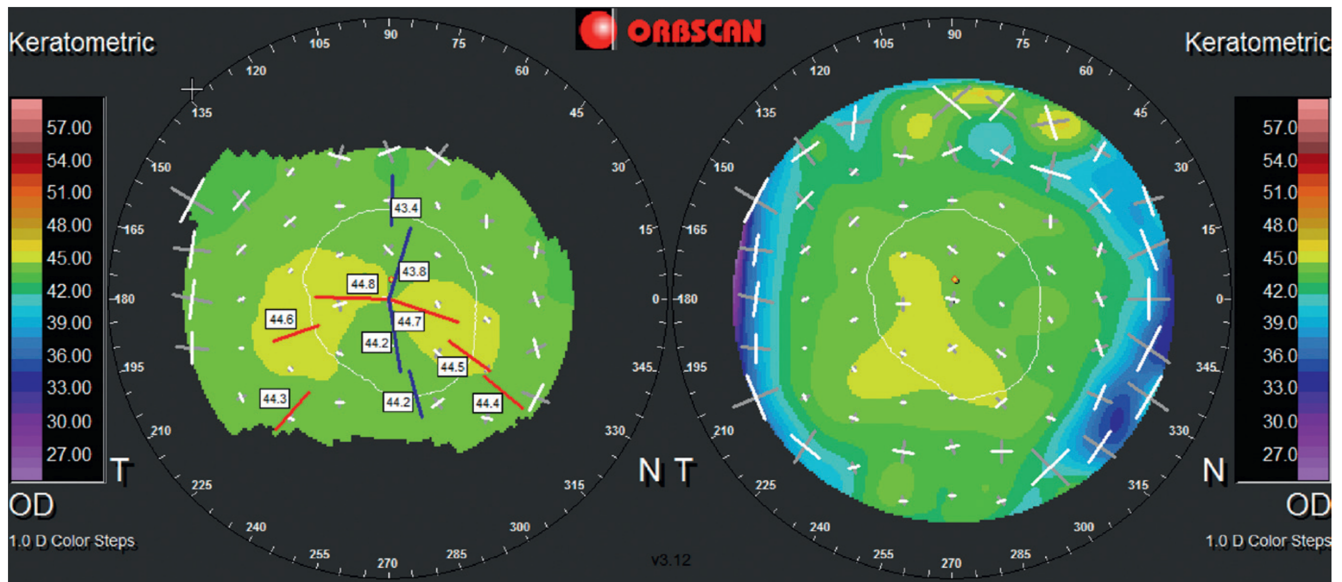
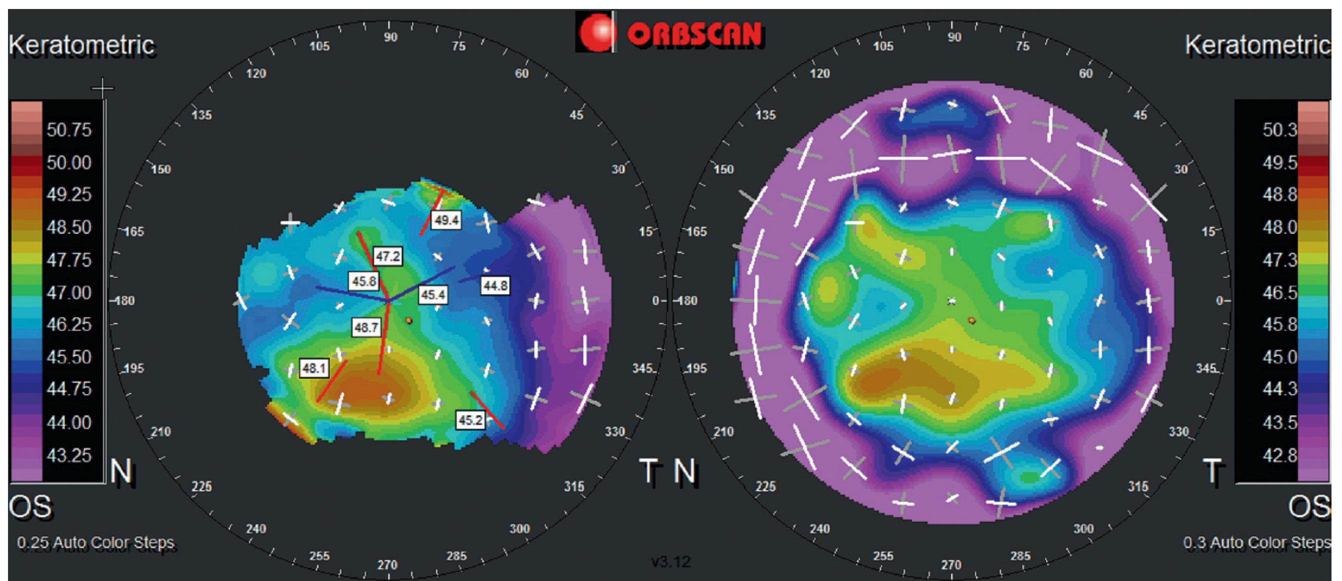



**Fig. 4.17. Comparaison entre une représentation de courbure en mode axial (à gauche) et kératométrique moyen (à droite).** *Le mode kératométrique moyen est calculé à partir de données d'élévation (balayage par fente), alors que la carte en mode axial découle des données spéculaires (réflexion du disque de Placido). Les « croix » formées d'une branche gris clair et d'une autre foncée correspondent aux directions des courbures extrêmes en chaque point. Pour une cornée indemne de déformation asymétrique, les branches foncées seraient orientées de façon parfaitement radiaire, le long des directions de mesure « instantanée ». Si la carte axiale donne une idée relativement précise de l'axe des méridiens les plus cambrés (astigmatisme non conforme), la carte en courbure moyenne révèle une cambrure locale moyenne qui s'accentue légèrement en paracentral inférieur, et une périphérie sensiblement plus plate que mesurée en mode axial (les échelles colorimétriques sont identiques).* N.-B. *La direction des extrêmes de courbure est obtenue en cliquant sur « min-max » dans le menu « map options » avec le logiciel de l'Orbscan.*



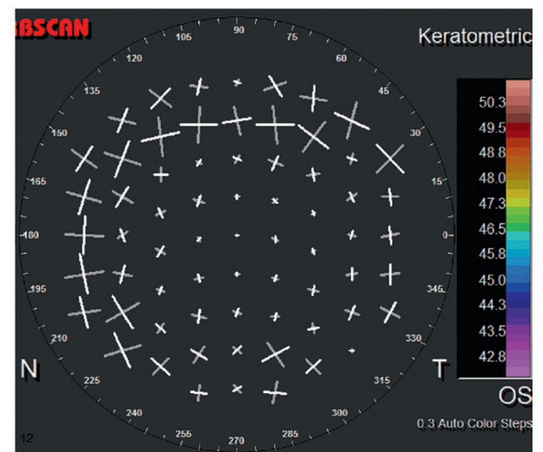




**Fig. 4.18. Comparaison entre une représentation de courbure en mode tangentiel ou instantané (à gauche) et kératométrique moyen (à droite) chez un patient présentant un kératocône débutant.**
*L'asymétrie est bien mise en évidence en courbure instantanée (nœud papillon asymétrique). Le mode kératométrique moyen est calculé à partir de données d'élévation (balayage par fente), alors que la carte en mode instantané découle des données spéculaires (réflexion du disque de Placido). Ici, l'asymétrie (hypercambrure dans l'hémicornée inférieure) est bien rendue dans les deux modes. On note la désorientation relative des directions de courbures locales extrêmes, notamment dans la région de l'apex du cône (les directions « min max » de la carte en courbure moyenne sont reprises en bas).*

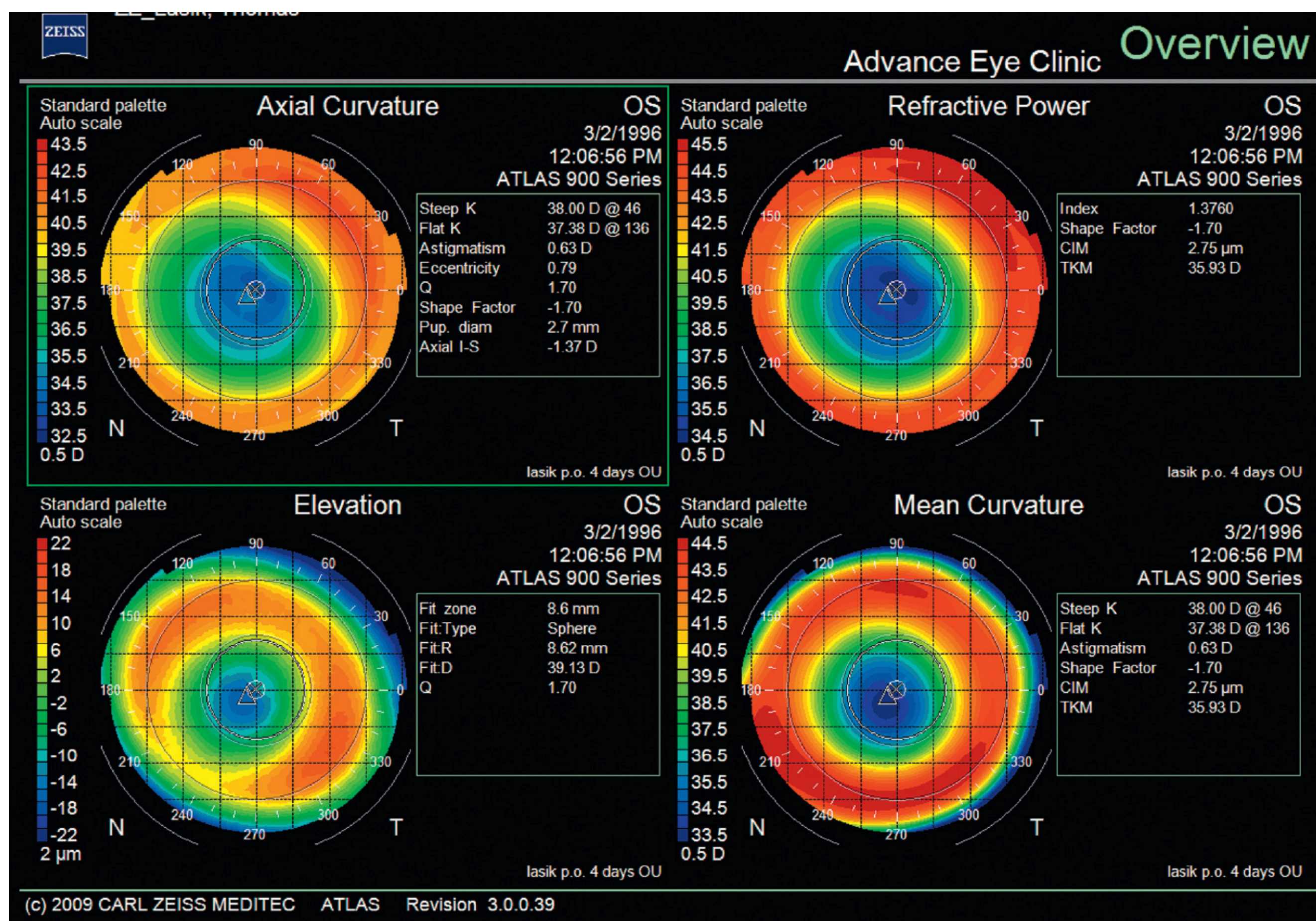



**Fig. 4.19.** ***Cornée après Lasik pour myopie : comparaison entre une représentation de courbure (axiale : en haut à gauche, moyenne : en bas à droite), une représentation en élévation (en bas à gauche) et le calcul de la puissance réfractive (en haut à droite).***
*Toutes ces cartes possèdent une répartition globale des couleurs globalement concentrique, car la surface cornéenne analysée présente une quasi-symétrie de révolution.*

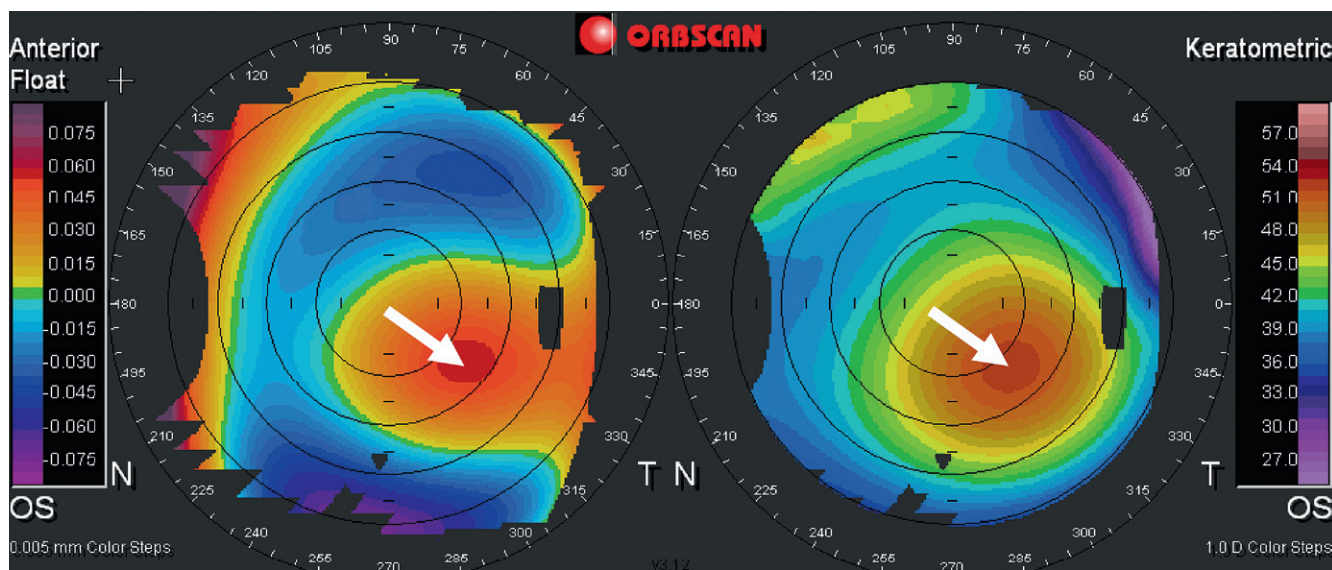



**Fig. 4.20.** ***Représentation en élévation (à gauche) et en courbure moyenne (à droite) d'une surface antérieure de cornée (œil gauche) chez un patient atteint de kératocône bilatéral.***
*Noter la concordance entre la zone où l'élévation est maximale, et celle ou la courbure moyenne est la plus élevée (flèche).*

## Références

[1] Salmon TO, Horner DG. Comparison of elevation, curvature, and power descriptors for corneal topographic mapping. Optom Vis Sci 1995 ; 72 (11) : 800–8.
[2] Gatinel D. Principes et intérêt de la modélisation cornéenne en chirurgie refractive. In : Saragoussi JJ, Arné JL, Colin J, Montard M, editors. Chirurgie refractive. Paris : Société française d'ophtalmologie et Masson ; 2001. p. 84–95.
[3] Gatinel D. Anatomie cornéenne fonctionnelle appliqué au Lasik. In : Le Lasik, de la Théorie à la Pratique. Paris : Elsevier ; 2003. p. 12–7.
[4] Gatinel D. Corneal Topography and Wavefront analysis. In : Albert DM, Jakobiec FA, editors. Principles and Practice of Ophthalmology. 4th ed. USA : Saunders, Elsevier ; 2007.
[5] Szczotka-Flynn L, Jani BR. Comparison of axial and tangential topographic algorithms for contact lens fitting after Lasik. Eye Contact Lens 2005 ; 31 (6) : 257–62.
[6] Chan JS, Mandell RB, Burger DS, Fusaro RE. Accuracy of videokeratography for instantaneous radius in keratoconus. Optom Vis Sci 1995 ; 72 (11) : 793–9.

Chapitre 5

# Pouvoir optique, cartes de puissance réfractive et de front d'onde cornéen

La topographie cornéenne est à la fois un outil diagnostique qui permet d'identifier diverses conditions susceptibles d'altérer le relief cornéen, mais également d'étudier les propriétés fonctionnelles de celui-ci. Ce rôle est dévolu aux cartes de puissance optique (ou « cartes de puissance réfractive », cartes en « mode réfractif », etc.). La quête d'une mesure quantitative des propriétés du sommet et des bords de la cornée est principalement liée à deux nécessités cliniques : y adapter une lentille de contact, et calculer sa puissance optique.

Les cartes de puissance optique fournissent des informations fonctionnelles, et les valeurs qu'elles fournissent doivent être distinguées de celles les cartes de courbure, malgré une terminologie parfois confuse, et l'ambiguïté introduite par l'utilisation de l'unité « dioptrie » pour qualifier des données de courbure.

# Généralités

La puissance optique fait ici référence à la capacité d'une lentille à focaliser la lumière vers un foyer, une puissance plus élevée étant corrélée à une réfraction plus élevée (foyer proche de la lentille) et une puissance plus faible à une réfraction plus faible (foyer plus lointain).

La puissance optique de la cornée dépend de sa courbure, mais aussi d'autres facteurs comme la différence d'indice entre les milieux réfractant, ainsi que l'angle que forment avec leur surface les rayons lumineux incidents [1].

La distance focale d'un système optique comme une lentille mince correspond à la distance séparant la lentille du point d'intersection entre un rayon réfracté (proche de l'axe optique) et l'axe optique. Une distance focale plus courte est associée à une puissance plus élevée et une distance focale plus longue est associée à une puissance plus faible.

La cornée peut être modélisée sous forme d'une surface réfractive unique aux fins de déterminer sa contribution à la puissance globale du système optique de l'œil. Nous choisirons pour commencer un profil cornéen simplement circulaire (Fig. 5.1). La cornée correspond alors un dioptre sphérique, centré sur son axe optique.

À ce stade, il est important de concevoir que les topographes spéculaires ne recueillent des informations que pour la seule face antérieure de la cornée. Pour estimer de manière plus réaliste la puissance totale du dioptre cornéen, il est nécessaire d'extrapoler l'effet de la face postérieure de la cornée. Ce point a son importance, comme nous le verrons plus loin.

# Calcul du pouvoir optique du dioptre cornéen

L'estimation de la puissance optique cornéenne est une donnée importante pour de nombreuses applications, dont le calcul biométrique (biométrie, calcul de la puissance d'implants phakes, etc.), et la chirurgie réfractive

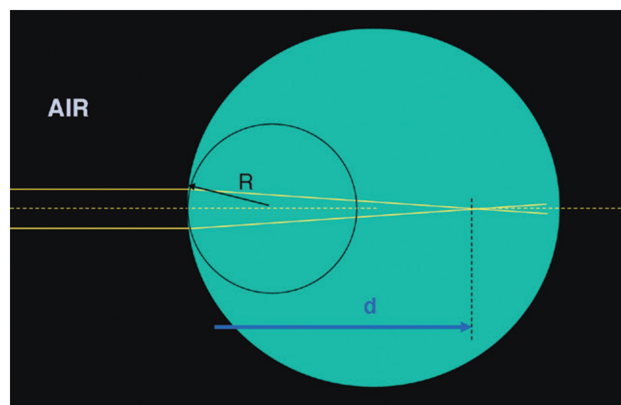



***Fig. 5.1.*** ***Réfraction par une surface sphérique (dioptre) dans l'air.***
*La lumière incidente provient d'une source lumineuse ponctuelle située sur l'axe et suffisamment distante pour que les rayons incidents soient parallèles. On cherche à connaître la distance focale d pour les rayons incidents proches de l'axe. L'inverse de cette distance est égal à la* puissance dioptrique *de la surface. Une bonne approximation de cette distance est fournie par une formule dite de « vergence » et qui s'exprime comme : 1/d = (n-1)/R. 1/d est appelée la puissance optique paraxiale, R est le rayon du cercle osculateur au sommet de la surface (courbure apicale), et n l'indice de réfraction du milieu réfractant. Exemple : R = 7,8 mm, n = 1,333. 1/d = 0,333/0,0078 = 42,7 D (la distance focale est d = 2,34 cm). Cette formule ne fournit la puissance focale de la cornée qu'en son sommet ! (au voisinage de son axe optique). En effet, elle n'est valable que lorsque l'angle d'incidence des rayons à la surface de la cornée est peu prononcé.*

cornéenne. La puissance optique de la cornée est définie dans ce contexte comme celle de la zone apicale : elle permet de calculer une distance focale (d), qui est exprimée en mètres et définie comme l'inverse de la valeur de la puissance optique apicale (exprimée en dioptries) : d = 1/P (Fig. 5.1).

Dans cette approche simplifiée, l'axe optique et l'axe géométrique de la cornée sont confondus, et la distance focale de la cornée est définie comme la distance entre le vertex cornéen et le point d'intersection des rayons réfractés par la portion centrale de la cornée (région apicale ou paraxiale) avec l'axe optique. Les rayons lumineux y sont incidents à proximité du centre de la cornée, et font un angle d'incidence faible par rapport à la normale de la surface cornéenne au point d'incidence considéré (la normale à la surface cornéenne est la droite localement perpendiculaire à la surface de la cornée au point considéré).

## Calcul de la puissance apicale de la face antérieure de la cornée

Dans les conditions où l'on considère les rayons proches de l'axe optique, appelées « conditions paraxiales » (et dans ces conditions seulement, en pratique pour des points situés à environ moins de 2 mm du sommet), le pouvoir optique de la cornée antérieure peut être calculé en utilisant une formule dite « de vergence » :

$$P = 1/d = (n-1)/R$$

où d est la distance focale, n est l'indice de réfraction (pour le stroma, l'indice de réfraction physique est proche de la valeur : 1,376, mais on utilise dans certains cas une valeur minorée dite kératométrique proche de 1,33) et R le rayon de courbure apical du méridien considéré.

En cas de toricité apicale importante (astigmatisme cornéen), la valeur de R peut être choisie comme la moyenne entre les rayons apicaux extrêmes (le plus petit et le plus grand) si l'on souhaite obtenir une valeur moyenne de la puissance apicale antérieure.

La valeur ainsi obtenue pour P est exprimée en dioptries et correspond véritablement au pouvoir optique de la région apicale de la *face antérieure* cornée.

La formule de vergence est obtenue à partir d'un calcul utilisant les lois de la réfraction (Snell) et quelques simplifications qui ne sont valables *pour les points situés à proximité immédiate de l'axe optique*.

En effet, ces simplifications ne sont plus valides pour prédire la valeur de la puissance optique de la face antérieure de la cornée pour les points localisés à distance de l'axe optique. Ceci est lié au fait que les rayons lumineux réfractés au niveau de la cornée non paracentrale et de la cornée périphérique ont un angle d'incidence plus élevé (cet angle est formé entre la direction du rayon incident et la direction normale — ou perpendiculaire — à la surface). En périphérie, cet angle est donc plus important, car la direction correspondant à la normale à la surface tend à être de plus en plus « verticale ». Ceci conduit à augmenter la valeur de l'angle de réfraction (Fig. 5.2). On ne peut alors utiliser la formule de vergence pour estimer le pouvoir optique de la cornée vis-à-vis d'un faisceau de rayons incidents parallèle à l'axe optique.

L'utilisation de la formule de vergence pour des points situés « loin » de l'axe optique est pourtant effectuée pour la conversion en échelle dioptrique des cartes de topographie en courbure axiale et instantanée initialement exprimées en millimètres (rayon de courbure). On parle alors de puissance « kératométrique » [2] ; le terme « kératométrique » fait implicitement référence à l'utilisation d'un indice de réfraction volontairement minoré, comme nous le verrons plus loin. La formule de vergence simplifiée est appliquée sans distinction à tous les points de la surface cornéenne, et utilise les valeurs du rayon de courbure qui est mesuré en chacun de ces points (Fig. 5.3). Elle conduit à une sous-estimation de la puissance optique réelle pour les points situés à distance de l'axe optique (hors conditions paraxiales), et on ne doit pas utiliser de manière interchangeable ces « dioptries de courbure » en « dioptries de puissance optique » en dehors des conditions paraxiales. Les Fig. 5.4 et 5.5 illustrent cette différence fondamentale.

## Calcul de la puissance apicale totale de la cornée

L'obtention de la valeur de la puissance apicale totale de la cornée est importante dans de nombreuses situations cliniques, comme le calcul biométrique : connaître la puissance de la région apicale de la cornée conditionne la précision du calcul biométrique, qui dépend également de la mesure de la longueur axiale et de la qualité de prédiction de la position de l'implant vis-à-vis de la

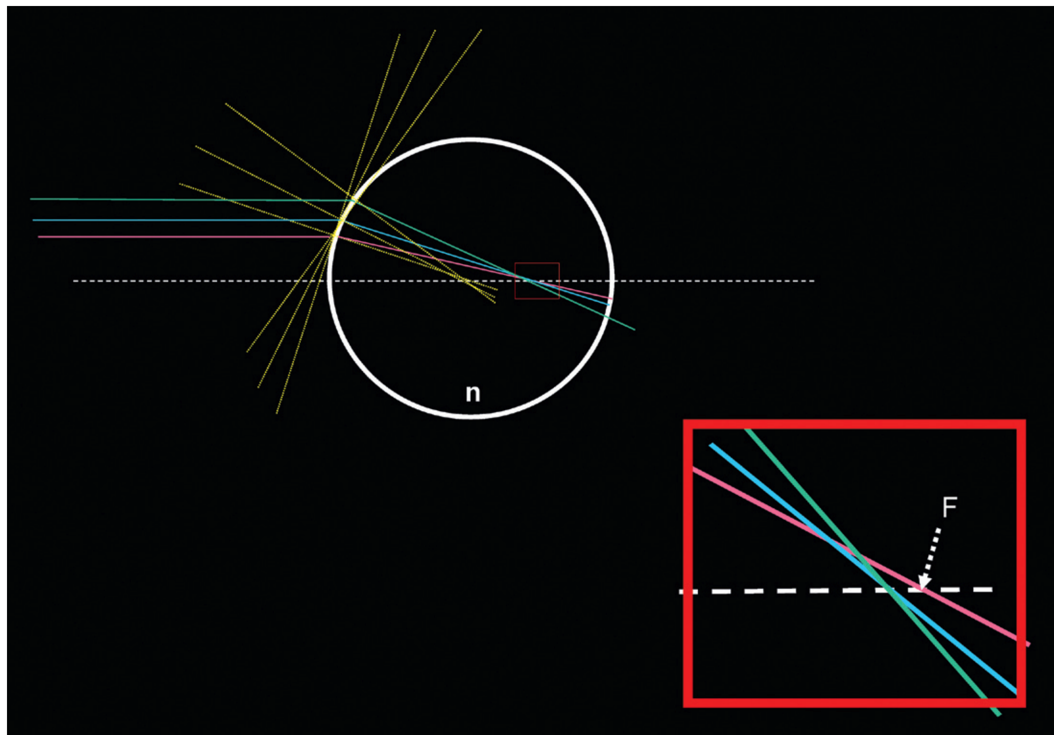



**Fig. 5.2.** ***Représentation schématique de la réfraction par une surface sphérique (en coupe).***
*Les couleurs des rayons incidents sont différentes pour des raisons didactiques, mais ils proviennent ici d'une même source ponctuelle située « à l'infini » et non représentée ici ; Quand ces rayons parallèles rencontrent la surface, l'angle qu'ils forment avec elle (défini comme l'angle entre le rayon et la tangente à la surface au point d'incidence) croît du centre vers les bords. Cet accroissement est souhaitable pour « maintenir » la direction des rayons réfractés vers le même point (foyer image). Dans le cas d'une surface sphérique, cet accroissement est excessif et les rayons sont réfractés d'autant plus « près » qu'ils sont périphériques : la puissance focale augmente légèrement du centre vers les bords. Il en résulte une réduction du stigmatisme, et l'aberration en cause ici est nommée à juste titre « aberration sphérique », et elle est par convention de signe positif quand la puissance augmente vers les bords. La cornée est légèrement asphérique ; elle s'aplatit légèrement du centre vers les bords, mais ne le fait pas assez pour corriger toute l'aberration sphérique, qui demeure en moyenne légèrement positive.*

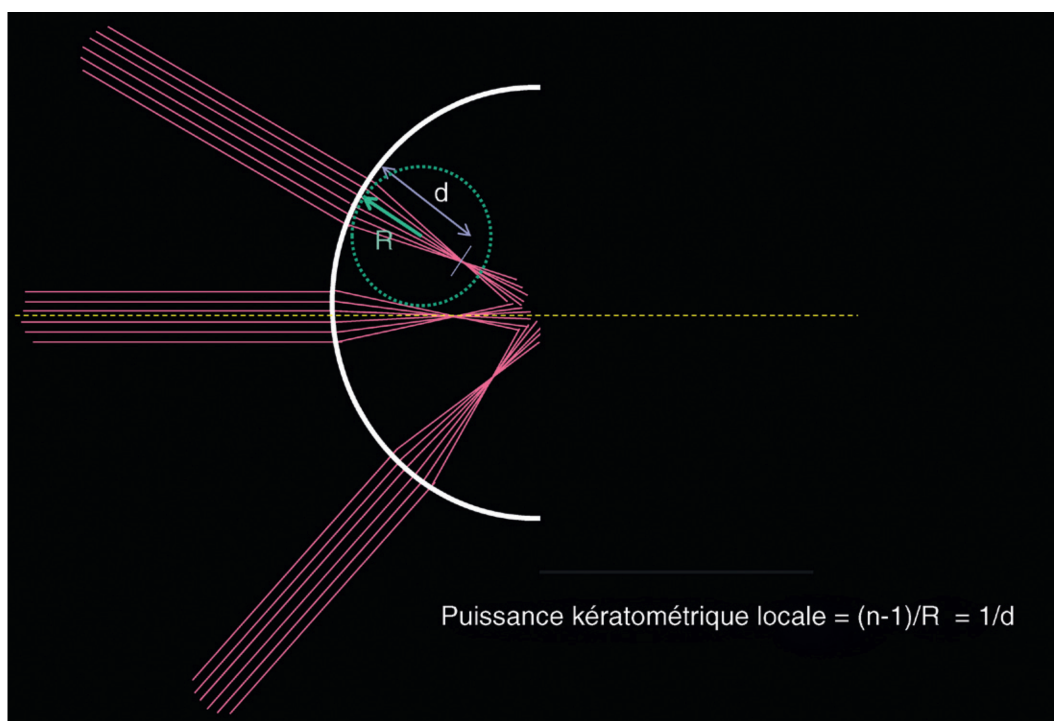



***Fig. 5.3.*** ***Représentation schématique du calcul de la puissance kératométrique locale, à partir de la formule de vergence.***
*Cette puissance optique est inversement proportionnelle à la valeur du rayon de courbure local R, puisqu'elle est calculée au moyen de la formule de vergence simplifiée. Cette formule, qui convertit des « millimètres de rayon de courbure » en « dioptries de courbure », suppose que l'angle d'incidence des rayons avec la normale au point de mesure est faible. La puissance kératométrique serait celle du faisceau de rayons lumineux (dont le diamètre a été volontairement exagéré sur la figure) qui frapperait toujours de manière perpendiculaire la surface de la cornée au point de mesure, quelle que soit sa distance avec l'axe optique (en pointillés jaunes). Cette puissance est l'inverse de la distance d (exprimée en mètres) qui sépare la surface cornéenne et l'endroit où focalise le faisceau incident réfracté au point de mesure. La puissance kératométrique ne doit pas être confondue avec la puissance optique de la cornée; elle n'est égale à celle-ci qu'au sommet (et à condition d'utiliser la même valeur d'indice de réfraction pour leur calcul). L'utilisation d'un indice de réfraction n = 1,376 dans la formule de vergence permet de calculer la puissance kératométrique locale (courbure axiale ou instantanée exprimée en dioptries) de la face antérieure de la cornée (interface air/cornée antérieure). L'utilisation d'un indice de réfraction de valeur minorée (n = 1,33) fournit une estimation de la puissance kératométrique totale. Si la surface cornéenne était parfaitement sphérique, la puissance kératométrique y serait identique en tous points.*

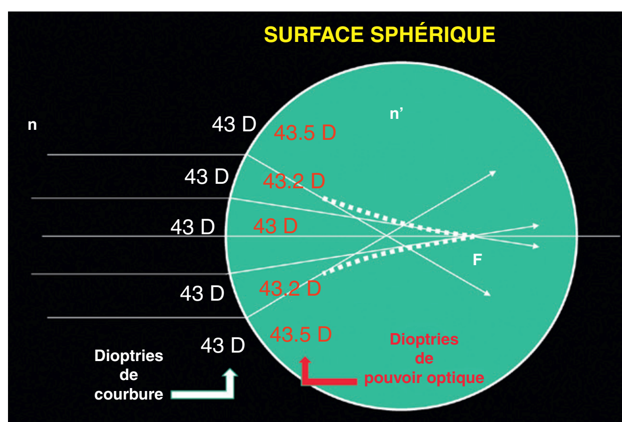



***Fig. 5.4.*** ***Réfraction par un dioptre sphérique : la courbure y est constante.***
*Dans cet exemple, le rayon de la surface est 7,67 mm. L'indice choisi est minoré (indice kératométrique n = 1,33). L'utilisation de la formule de vergence sur l'ensemble de la surface conduit toujours à la même valeur de 43 D pour ce qui est de l'expression de la courbure locale en dioptries (c'est-à-dire la puissance kératométrique). En revanche, le calcul de la puissance optique (ou pouvoir optique), accompli en utilisant les lois de la réfraction (lois de la réfraction de Snell, optique géométrique), révèle une augmentation progressive de la puissance réfractive au niveau périphérique, c'est-à-dire « non paraxial ». Dans la région paraxiale, les valeurs obtenues entre puissance kératométrique et pouvoir optique sont toutefois quasi identiques (ce qui est attendu puisque la formule de vergence simplifiée est obtenue à partir des lois de Snell, au prix de certaines simplifications). C'est pour cela que la formule de vergence simplifiée peut être utilisée pour calculer la puissance optique* apicale *de la cornée (ou d'une surface cornéenne isolée).*

cornée. La puissance apicale totale de la cornée est égale à la somme des puissances apicales (paraxiales) respectives de sa face arrière et de sa face avant. Il n'est possible que pour les topographes qui recueillent des données au niveau de la face postérieure de la cornée. La puissance cornéenne totale est alors calculée comme le résultat des réfractions antérieure et postérieure, en tenant compte de l'épaisseur (distance) entre ces deux surfaces cornéennes. En plus des valeurs respectives des rayons de courbure apicale antérieure et postérieure, il faut utiliser les valeurs respectives des indices de réfraction « physique » du stroma et de l'humeur aqueuse dans la formule de vergence.

## Estimation de la puissance apicale totale de la cornée

Quand les données de la face postérieure ne sont pas accessibles (topographie spéculaire antérieure pure), la puissance cornéenne totale apicale ne peut pas être calculée : elle ne peut être qu'*estimée*.

Contrairement à la face antérieure, la réfraction à travers la face postérieure de la cornée fait passer la lumière d'un milieu plus réfringent (le stroma) à un milieu moins réfringent (l'humeur aqueuse). Cette variation d'indice (de signe opposé à celle qui existe entre l'air et le film lacrymal) explique que la face postérieure, bien que convexe, possède dans l'œil un effet divergent. Cet effet est modéré, car même si la région apicale de la face

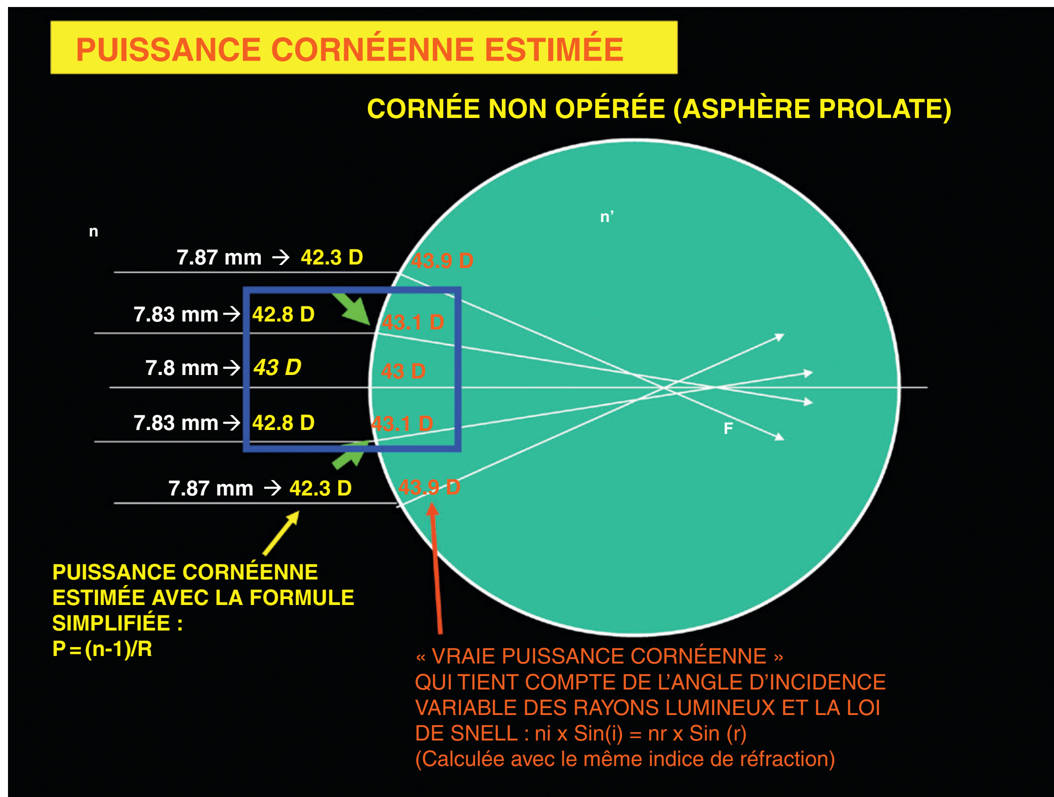



***Fig. 5.5. La cornée est une surface asphérique.***
*Elle est prolate, ce qui signifie que la courbure décroît progressivement vers les bords (le rayon de courbure augmente). Si l'on applique la formule de vergence à l'ensemble des points de la surface dont on connaît la courbure locale, on observe une réduction des valeurs obtenues du centre vers les bords : la puissance kératométrique diminue. Toutefois, le calcul de la puissance optique par les lois de la réfraction révèle au contraire que les chiffres obtenus (correspondant au pouvoir optique) augmentent. Cette augmentation est moins rapide que dans le cas d'une surface cornéenne parfaitement sphérique, car l'asphéricité prolate réduit l'augmentation de l'angle d'incidence des rayons avec la surface. Pour annuler, voire inverser le signe de l'aberration sphérique (devenant alors négative), le caractère prolate de l'asphéricité cornéenne devrait être plus prononcé (la cornée devrait s'aplatir encore plus fortement vers les bords).*

postérieure cornéenne est plus convexe que celle de la face antérieure, la différence d'indice de réfraction est faible à ce niveau (1,376 pour le stroma contre 1,33 pour l'humeur aqueuse, soit une valeur proche de 0,046).

L'exemple numérique exposé sur la Fig. 5.6 établi à partir de valeurs typiques de rayons apicaux mesurés pour la face antérieure et postérieure de la cornée montre que la face postérieure atténue environ 10 % de la vergence antérieure apicale. Cette réduction est généralement vérifiée pour la plupart des cornées saines et vierges de toute chirurgie, car il existe une corrélation entre les courbures antérieures et postérieures (plus la face antérieure est convexe, plus la face postérieure tend à l'être aussi).

En minorant la valeur de l'indice de réfraction du stroma cornéen (ex : n = 1,333, n = 4/3, n = 1,3375 selon les fabricants) dans la formule de vergence, on obtient une valeur moindre que celle obtenue avec l'indice physique. La réduction est du même ordre que celle induite par la face postérieure de la cornée à la puissance cornéenne centrale totale. Choisir une valeur d'indice plus faible entraîne une réduction équivalente de la puissance cornéenne antérieure (environ 10 %), sans pour autant avoir à mesurer la puissance de la face postérieure de la cornée.

Cet indice minoré doit être qualifié de « kératométrique », car il n'est pas un véritable indice de réfraction au sens physique du terme. Cette « astuce » est utilisée par les logiciels des topographes antérieurs purs. Elle ne « fonctionne » toutefois qu'à la condition que l'écart entre les courbures antérieures et postérieures ne soit pas augmenté. Cette condition n'est pas respectée après chirurgie photoablative, qui modifie intentionnellement le rayon de courbure antérieur de la cornée.

Les cartes qui utilisent une valeur minorée (indice kératométrique) sont dénommées sans surprise « cartes de courbure ou puissance kératométrique ». À partir de la valeur des rayons de courbure de l'ensemble de la surface cornéenne, il est également possible d'établir des « cartes de puissance kératométrique antérieure », à condition d'utiliser la valeur réelle de l'indice de réfraction stromal. Les chiffres obtenus sont alors majorés d'environ 10 %.

## Applications cliniques

L'utilisation de la formule de vergence permettant d'estimer la puissance apicale totale de la cornée est une approximation valide pour les cornées non opérées. En revanche, après chirurgie cornéenne réfractive (ex : Lasik), la modification de courbure apportée à la seule face antérieure ne permet plus d'utiliser cette formule sous peine de surestimer le pouvoir optique total : c'est une des sources d'erreur de calcul biométrique pour les cornées opérées de chirurgie réfractive.

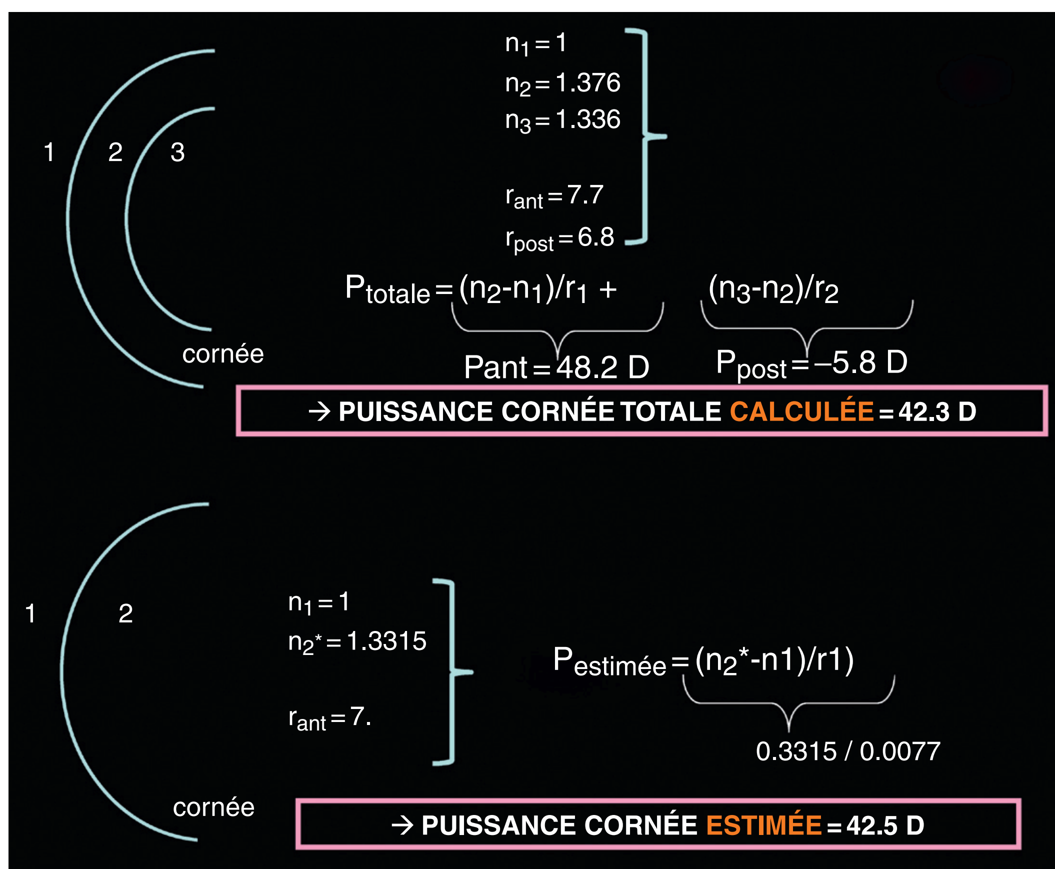



***Fig. 5.6.*** ***Comparaison entre la puissance optique cornéenne apicale totale* calculée *et* estimée *à partir des données de courbure de la face antérieure* et *de la face postérieure (en haut).***
*La puissance cornéenne totale est calculée comme la somme des puissances apicales antérieures et postérieures. En utilisant une formule de vergence avec indice de réfraction minoré, la puissance cornéenne totale est estimée à partir de données liées à la seule courbure antérieure. Dans la plupart des cornées normales et non opérées, ces deux méthodes aboutissent, comme dans cet exemple, à des valeurs numériques proches.*

## Kératométrie simulée (Sim-K)

Le calcul de la kératométrie simulée (Sim-K) est destiné à fournir les mêmes valeurs que celles que l'on obtiendrait en réalisant une mesure avec un kératomètre de type Javal. Ce kératomètre utilisait la réflexion de deux mires sur la face antérieure de la cornée pour en déduire la valeur de la courbure à 1,5 mm environ de part et d'autre du vertex cornéen. Une fois les valeurs kératométriques obtenues par le logiciel du topographe, les valeurs de la courbure des points situés sur un cercle distant de 1,5 mm du centre est exploré et l'emplacement du point de kératométrie maximale noté. L'axe du segment reliant ce point au sommet est repéré (Fig. 5.7). Cet axe est alors défini comme celui de l'axe du méridien le plus cambré. À partir de cet axe, une mesure du rayon de courbure est alors automatiquement effectuée à 1,5 mm du centre, mais cette fois-ci sur le méridien d'axe perpendiculaire, qui est *a priori* le plus plat (ceci n'est vrai que si la cornée ne présente pas de déformation majeure ; en cas d'irrégularité ou d'asymétrie, cette assomption n'est pas forcément respectée). À partir de la valeur de ces deux rayons, et de l'utilisation de la valeur « minorée » de l'indice de réfraction (indice dit « kératométrique ») une expression du Sim-K en dioptries est obtenue (ex : 41 D × 105°, 43 D × 15°). Ces valeurs peuvent être utilisées avant chirurgie de la cataracte pour le calcul biométrique d'un implant torique destiné à corriger un astigmatisme régulier d'origine cornéenne.

### Applications cliniques

Pour une cornée normale et vierge de toute chirurgie, l'estimation de la puissance cornéenne centrale moyenne par la mesure de la valeur moyenne du Sim-K est une méthode valable, car le point de mesure se situe dans la zone considérée comme paraxiale, et la courbure cornéenne moyenne change peu dans les 3 mm centraux. En revanche, la valeur du Sim-K n'est pas adaptée à l'estimation de la puissance cornéenne centrale pour les cornées ayant subi une chirurgie réfractive. Après chirurgie démyopisante, la courbure cornéenne est sujette à un gradient de courbure inverse et plus prononcé ; à 1,5 mm du centre, la cornée présente un excédent significatif de courbure par rapport à la région plus centrale, et la puissance cornéenne dans cette région est plus faible que celle fournie par la valeur du Sim-K [3].

La mesure de la puissance cornéenne apicale totale réelle (pouvoir optique résultant des réfractions successives par les faces antérieures et postérieures de la cornée) n'est possible que si l'on possède les données de courbure de la face antérieure et de la face postérieure de la cornée.

À partir de la mesure du rayon de courbure apical antérieur, l'utilisation de la formule de vergence avec un indice de

réfraction minoré permet d'estimer la puissance cornéenne totale. L'utilisation de cette technique de calcul sur une cornée dont la courbure antérieure a été modifiée chirurgicalement peut conduire à une mauvaise estimation de la puissance totale de la cornée, et donc à une erreur de calcul biométrique.

L'estimation correcte de la puissance optique de la cornée après chirurgie cornéenne de la myopie peut être accomplie en mesurant conjointement les puissances optiques cornéennes antérieures et postérieures (possible en topographie d'élévation).

## Cartes de puissance réfractive de l'ensemble de la surface cornéenne

Contrairement aux cartes de courbures, les cartes de puissance réfractive représentent la puissance optique calculée en chaque point de la surface cornéenne, en supposant un large faisceau incident de rayons parallèles. Cette puissance est calculée *grâce aux lois de Snell*, et non à partir de la formule simplifiée de vergence. Ces cartes portent parfois le nom de « carte de puissance optique de Snell » (*Optical Snell Power*). La carte de puissance réfractive cornéenne antérieure est établie grâce aux informations de courbure recueillies par le topographe, et en tenant compte de l'angle d'incidence des rayons lumineux et de l'indice de réfraction du tissu stromal.

En dépit du fait que le rayon de courbure de la cornée antérieure diminue vers la périphérie dans les cornées légèrement prolates, les cartes de puissance réfractive antérieure traduisent généralement l'augmentation de la puissance optique cornéenne du centre vers la périphérie.

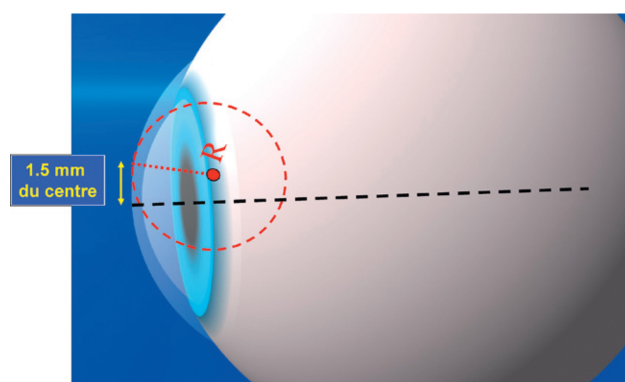



**Fig. 5.7. Sim-K/Kératométrie simulée : mesure de la courbure de la cornée, effectuée sur les méridiens de courbure extrême (le plus courbé et le plus plat) à 1,5 mm du centre de la cornée.**
*Pour une cornée saine et non opérée, la valeur mesurée est quasiment équivalente à celle qui serait mesurée au centre géométrique de la cornée, car le rayon de courbure local varie peu entre le sommet (vertex) et l'endroit de la mesure. Cette mesure, effectuée dans une zone relativement proche de l'axe optique de la cornée (zone paraxiale), fournit donc une valeur utilisable pour l'estimation de la puissance cornéenne apicale antérieure.*

Si le *pouvoir optique* de la face antérieure de la cornée augmente malgré la dégression de *courbure* vers la périphérie, c'est que cette dégression est insuffisante et ne contrebalance pas suffisamment les conséquences de l'augmentation progressive de l'angle d'incidence des rayons incidents vers la périphérie cornéenne, qui résulte en une augmentation excessive de l'angle de réfraction.

Cette notion est fondamentale et souligne la différence qui existe entre notions des cartes de courbures méridionales (= tangentielles/instantanées) ou axiales (= sagittales) kératométriques, et des cartes de puissance optique. Un exemple de cette différence est illustré par la Fig. 5.8. En chirurgie réfractive, les cartes de puissance réfractive sont plus adaptées pour estimer les dimensions de la zone optique fonctionnelle que les cartes axiales et instantanées.

L'indice de réfraction utilisé pour le calcul de la puissance réfractive de la cornée (que ce soit dans et/ou en dehors la région apicale) quand la face postérieure n'est pas mesurée est l'indice dit « kératométrique » n = 1,3375, choisi (comme dans le cas du calcul de la puissance kératométrique) pour « mimer » la réduction de pouvoir optique (effet divergent) de la cornée postérieure. Cette valeur minorée permet de réduire légèrement la puissance optique calculée de la cornée par rapport à celle qui serait obtenue en utilisant le vrai indice de réfraction physique de la cornée et en prenant en compte l'effet de la face postérieure de la cornée. Par conséquent, toute carte de puissance réfractive basée sur un indice de réfraction proche de 1,3375 doit être considérée comme une carte de puissance cornéenne totale estimée (pouvoir optique « kératométrique ») et *non* comme une carte de pouvoir optique « réel » de la seule surface antérieure.

Quand la face postérieure est mesurée, il est possible de réaliser une carte de puissance optique totale réelle de la cornée : un calcul de « lancer de rayons » (*ray tracing*) est alors effectué en utilisant les lois de la réfraction et les valeurs physiques des indices de réfraction au travers des faces antérieure et postérieure de la cornée (Fig. 5.9).

Parce qu'elles ne sont pas fondées sur certaines assomptions (proportionnalité entre puissances optiques cornéennes antérieures et postérieures centrales), les valeurs de puissance optique totale réelle calculées dans la région apicale de la cornée sont certainement plus à même de fournir une estimation précise de la puissance optique cornéenne apicale moyenne que la valeur de la kératométrie simulée (Sim-K) ou la carte de puissance kératométrique axiale après chirurgie réfractive (Fig. 5.10).

### Applications cliniques

– En cas de déformation ou d'irrégularité cornéenne importante, il est souvent impossible d'obtenir une mesure kératométrique fiable au moyen d'un simple kératomètre manuel (ou automatisé) qui effectue une mesure locale. L'utilisation de la topographie cornéenne permet d'accéder

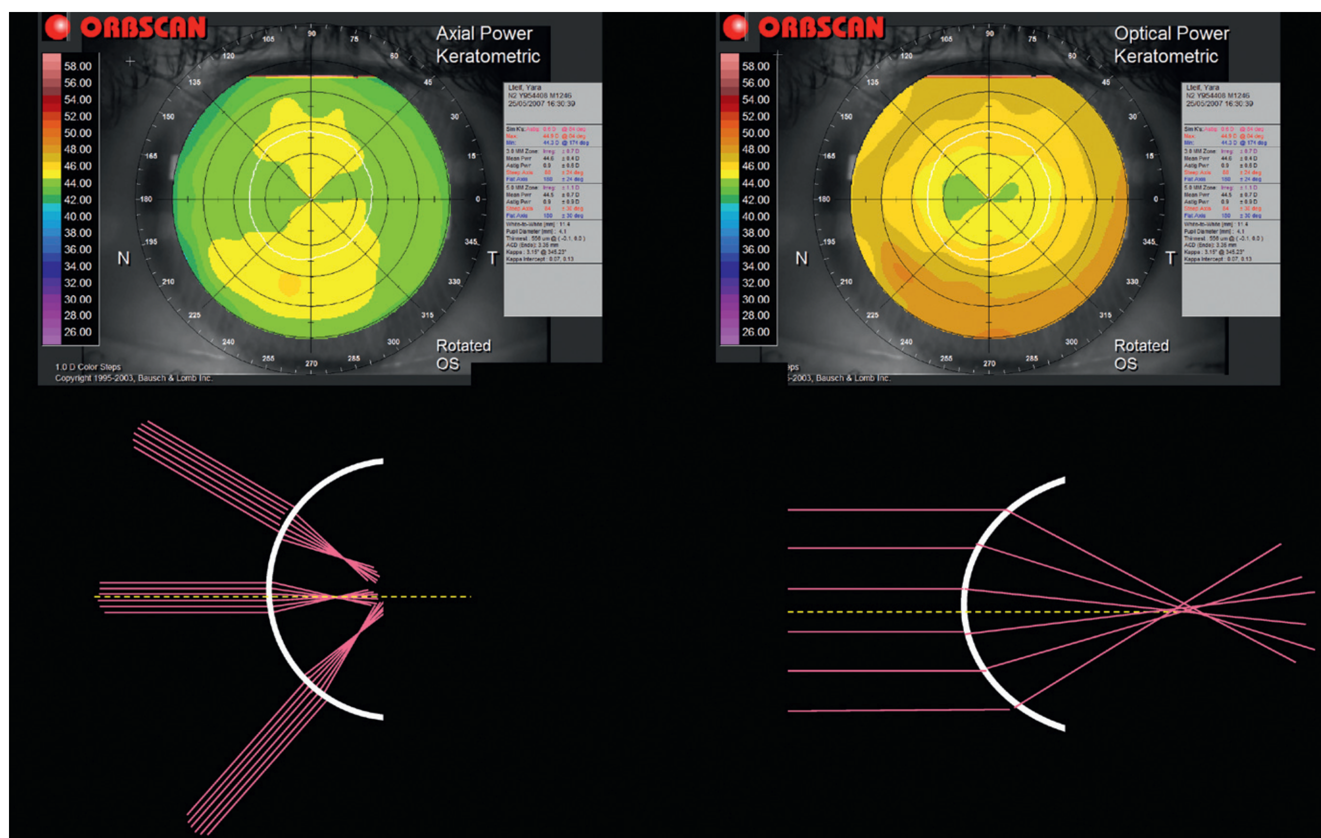



**Fig. 5.8. Comparaison entre une carte de courbure axiale (puissance kératométrique) et une carte de puissance optique pour la même surface antérieure.**
*L'amplitude et le pas de l'échelle dioptrique sont identiques. La valeur de l'indice de réfraction utilisée est minorée (indice kératométrique) par rapport à la valeur de l'indice physique stromal réel pour les deux représentations. La carte de courbure axiale (exprimée en dioptries : puissance kératométrique locale) révèle une cornée légèrement torique et prolate : la courbure axiale de la surface cornéenne est globalement plus grande au centre que vers les bords. Malgré une échelle strictement identique (même bornes, même pas), la carte de puissance optique révèle un aspect colorimétrique différent de la carte de puissance kératométrique : les couleurs plus chaudes en périphérie traduisent l'augmentation de la puissance optique de la cornée antérieure vers la périphérie. Cette cornée génère un certain taux d'aberration sphérique positive.*

à des mesures intéressant la surface de la cornée, et certains algorithmes ont été développés pour fournir un chiffre de kératométrie centrale moyenne dans l'aire pupillaire [4] (Fig. 5.11).

– En chirurgie réfractive, il est plus approprié de comparer les cartes de puissance réfractive préopératoires et postopératoires que les cartes de courbure axiales ou tangentielles pour estimer la modification fonctionnelle de la qualité optique de la cornée.

– L'augmentation de la puissance cornéenne vers la périphérie est encore plus rapide quand la valeur d'asphéricité est positive (aplatissement central – cambrure plus périphérique : cornée oblate). Elle provoque une accentuation de l'aberration sphérique positive après chirurgie réfractive pour myopie (Fig. 5.12 et 5.13).

– Le profil opposé de variation de courbure (cornée hyperprolate) est fréquent après chirurgie cornéenne pour hypermétropie (diminution rapide de la puissance cornéenne vers la périphérie, augmentation de l'aplatissement périphérique), et dans les cornées atteintes de kératocône évolué. L'accentuation de l'asphéricité prolate peut conduire à inverser le signe de l'aberration sphérique d'origine cornéenne (apparition d'une aberration sphérique négative).

# Front d'onde cornéen

L'étude de la distribution de la puissance réfractive (pouvoir optique) permet d'estimer la qualité optique de l'ensemble des points de la surface cornéenne. En topographie d'élévation, on peut accéder aux reliefs cornéens antérieur et postérieur ; il devient possible d'exprimer la puissance optique antérieure et/ou totale de la cornée comme une carte de front d'onde cornéen. Cette carte est utile pour l'étude de la qualité optique de la cornée ; elle exprime la manière dont la lumière est focalisée par l'ensemble du dioptre cornéen, et pas seulement la région apicale.

## Mesure du front d'onde cornéen

Le front d'onde est une abstraction mathématique qui est utile pour décrire le trajet de la lumière à travers un système optique, ici la cornée. Cette conception renvoie à des notions complexes d'optique physique, qui seront volontairement simplifiées.

En optique physique, la lumière est assimilée une onde électromagnétique, qui se propage à une vitesse variable selon l'indice de réfraction du milieu de propagation (d'autant plus lentement que l'indice du milieu est

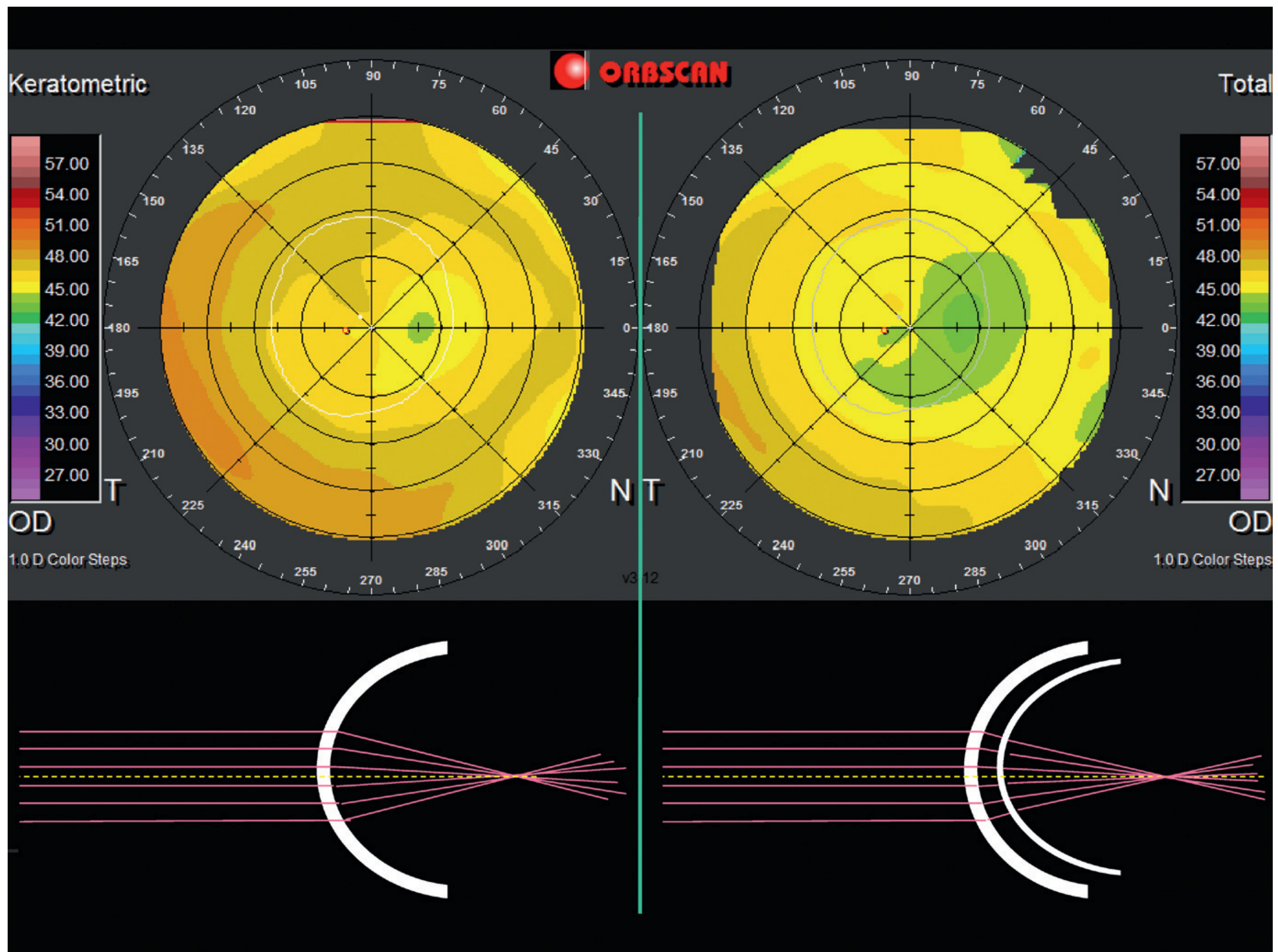



**Fig. 5.9. *Cartes de puissance optique estimée et totale (Orbscan : mode* optical power*).***
*À gauche, la carte représente la puissance (pouvoir) optique kératométrique, qui est estimée. À droite, la carte représente la puissance optique totale, qui est calculée. La carte de puissance optique kératométrique n'utilise que les données issues du recueil de l'élévation (ou de la courbure) antérieure. Une valeur minorée d'indice de réfraction est choisie pour estimer la valeur du pouvoir optique « kératométrique ». Cependant, contrairement au mode « puissance kératométrique », la formule simplifiée de vergence n'est pas utilisée ; ce sont les lois de la réfraction (lois de Snell) qui permettent d'estimer le pouvoir optique en chaque point de la cornée. La carte de puissance optique totale est également calculée en utilisant les lois de Snell, qui sont appliquées à des rayons incidents qui traversent successivement la face antérieure* et *la face postérieure de la cornée. Il est donc nécessaire de mesurer l'élévation cornéenne postérieure pour calculer une carte de puissance optique totale, et d'utiliser les valeurs physiques réelles des indices de réfraction. Les différences entre ces deux cartes sont légères, et sont liées aux différences entre l'effet estimé et réel de la face postérieure.*

élevé : la valeur de l'indice correspondant en fait au rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide et celle dans le milieu considéré). Les rayons lumineux sont une matérialisation du trajet des ondes lumineuses. Dans un milieu homogène, les ondes lumineuses se propagent en ligne droite, le long des « rayons lumineux », autour duquel elles oscillent transversalement. Les rayons lumineux sont en fait localement perpendiculaires au front d'onde. Pour former une image fidèle d'un point source lumineuse, le système optique doit être capable de diriger une partie des ondes lumineuses émises par le point source vers un écran ou une surface photosensible. Dans le cas qui nous intéresse, le système optique est restreint à la cornée, et l'écran photosensible est constitué par la rétine neurosensorielle.

Un faisceau de rayons incidents parallèle peut être assimilé à un train d'ondes lumineuses qui traversent plus lentement le tissu cornéen que l'air ambiant. Le rôle dévolu à la cornée est de focaliser les ondes lumineuses vers la fovéa (dans l'œil complet, le cristallin contribue également à cette focalisation). Focaliser la lumière incidente équivaut à dévier le trajet des rayons initialement parallèles de manière à les faire converger vers un point. Cela revient à convertir un front d'onde incident plan en un front d'onde réfracté « courbe ». Cette conversion s'effectue grâce au « ralentissement » sélectif des ondes lumineuses à mesure qu'elles rencontrent la cornée. À la sortie de la cornée qui est une coupole convexe, les ondes lumineuses convergent, et le front d'onde, qui matérialise l'enveloppe des ondes lumineuses « en phase », est lui-même une portion convexe.

Imaginons une cornée « idéale », c'est-à-dire capable de focaliser la lumière incidente en un point. À la sortie de la cornée, les rayons convergent en ce point. Le front d'onde est assimilable à une calotte parfaitement sphérique. À l'inverse, le front d'onde réfracté par une cornée « non idéale », c'est-à-dire pourvue d'aberrations optiques, n'est pas parfaitement sphérique (toutes les ondes

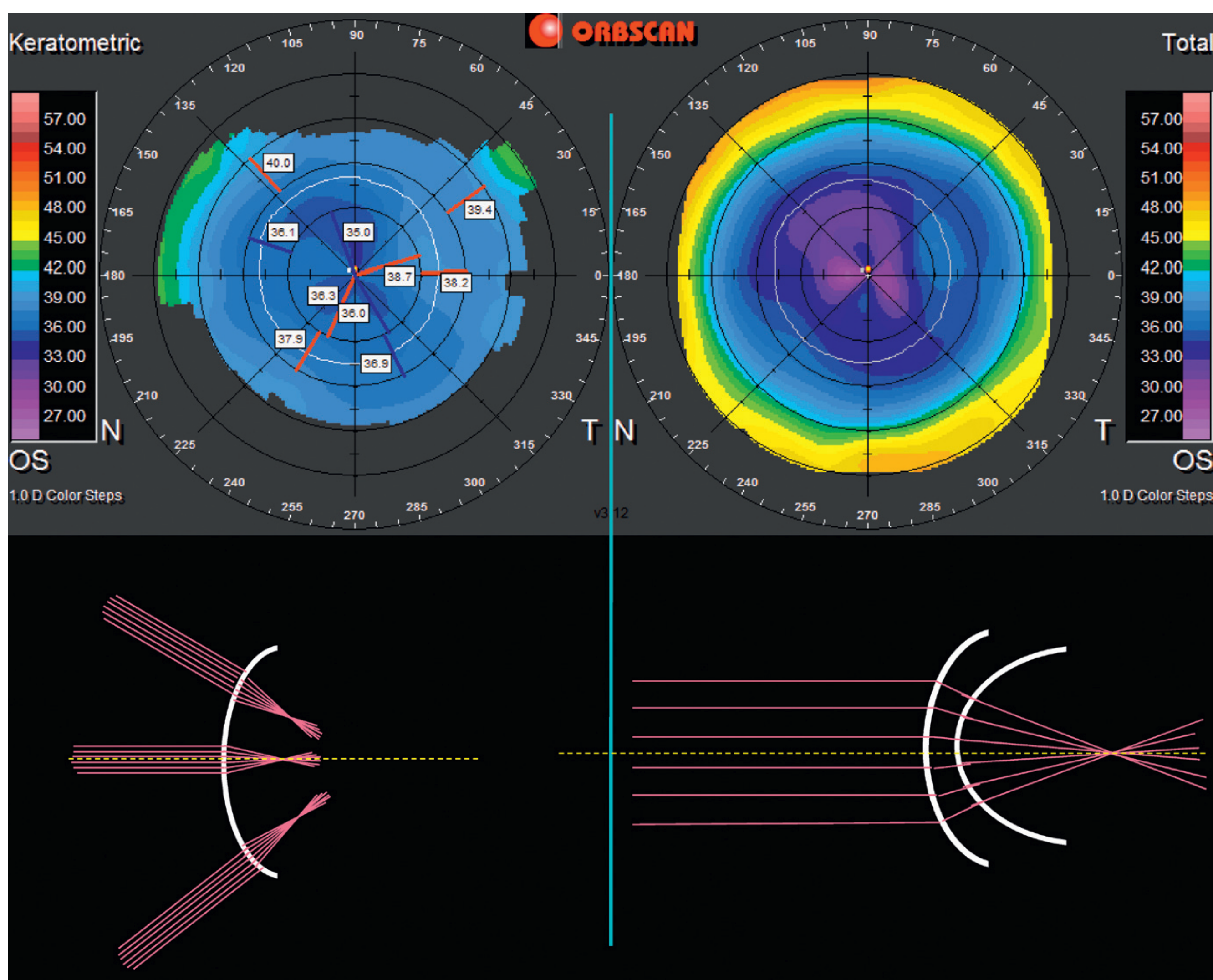



**Fig. 5.10.** ***Comparaison entre une carte de courbure axiale (puissance kératométrique) à gauche, et une carte de puissance optique totale pour un œil opéré de Lasik (myopie initiale : -8 D) à droite.***
*L'échelle est identique pour ces deux cartes. Le mode de puissance kératométrique axiale (surface antérieure seule, formule de vergence simplifiée, indice minoré ou kératométrique) fournit des valeurs qui sont nettement supérieures à celles obtenues avec la carte de puissance optique totale (lois de Snell appliquées aux deux surfaces cornéennes, valeurs non minorées des indices de réfraction). Si l'on utilise les valeurs fournies par la carte de courbure axiale (Sim-K), on risque de surestimer la puissance optique réelle de la cornée. L'effet divergent de la face postérieure de la cornée (dont la courbure n'est pas altérée par la chirurgie) explique que les valeurs obtenues sont moindres vers l'apex. En cas de calcul biométrique, la surestimation de la puissance optique de la cornée conduirait à une sous estimation de la puissance calculée de l'implant pour la réfraction cible visée.*

lumineuses ne se dirigent pas exactement vers le même point de l'espace pour y interférer constructivement) (Fig. 5.14). Les aberrations optiques sont une manière de quantifier l'écart (la distance) qui existe entre un front d'onde idéal et un front d'onde « aberré ». Leur calcul de cet écart est effectué en utilisant le principe de « réversibilité » du trajet de la lumière (Fig. 5.15) [5]. L'écart avec le front d'onde plan varie localement, mais on peut en quantifier l'importance en effectuant un calcul qui fournit une sorte de « moyenne », appelée taux RMS (pour *Root Mean Square*, racine carrée de la somme des carrés des écarts à la moyenne). On peut décomposer cet écart en un jeu d'aberrations élémentaires, elles-mêmes affectées d'un coefficient qui représente le « poids » de l'aberration considérée (quantifiant l'importance de la contribution de l'aberration à la déformation du front d'onde cornéen). Le jeu d'aberration généralement utilisé correspond aux polynômes de Zernike, qui possèdent des propriétés mathématiques intéressantes dans ce contexte.

La face antérieure est celle qui contribue le plus à la formation du front d'onde cornéen. Alors que certains topographes d'élévation permettent le calcul du front d'onde cornéen total grâce à la mesure conjointe des faces antérieures et postérieures de la cornée, les topographes spéculaires ne calculent que le front d'onde cornéen antérieur. Le calcul est effectué en utilisant un indice de réfraction minoré, et réalise une comparaison entre le front d'onde d'une cornée « idéale » dont la puissance apicale est la même que celle de la cornée mesurée. Cette cornée idéale est comparable à l'ovale de Descartes, qui est une surface asphérique dépourvue d'aberrations sphériques. Le calcul de son facteur d'asphéricité Q aboutit à une formule simple : $Q = -1/n^2$, où n est l'indice de réfraction (n = 1,33 dans le cas présent, soit Q = -0,56). Le front d'onde est ensuite calculé grâce à un algorithme reposant sur le calcul de différence de chemin optique entre la cornée mesurée et la cornée « idéale ».

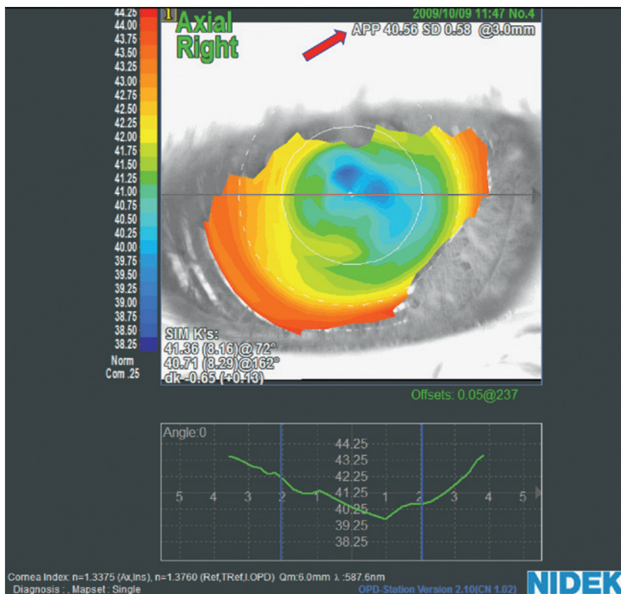



***Fig. 5.11.** Représentation en mode kératométrique (courbure axiale, exprimée en dioptries, calculée par la formule de vergence simplifiée et un indice de réfraction minoré : n = 1,3375) d'une face antérieure de la cornée d'un œil opéré de Lasik myopique.*
*Le contour cornéen présente un aspect globalement oblate, mais la zone optique centrale présente une irrégularité importante (noter l'aspect « ondulé » de la courbe de profil kératométrique le long du méridien horizontal). La mesure par kératométrie simulée (Sim-K's) fournit une valeur kératométrique moyenne proche de 41 D, légèrement supérieure à la mesure de la puissance cornéenne moyenne calculée pour la une zone centrale de 3 mm (40,56 D). Noter, toutefois, la déviation standard importante (0,58 D) autour de cette moyenne : elle reflète une certaine « multifocalité » induite par la photoablation et le remodelage cicatriciel.*

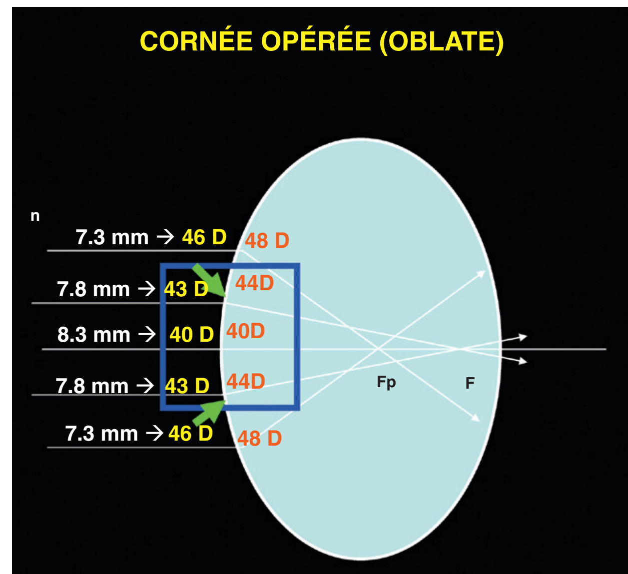



***Fig. 5.12.** En cas de cornée de profil oblate (courbure croissante du centre vers les bords), la différence entre les chiffres fournis par la formule de vergence simplifiée (puissance kératométrique : en jaune) et ceux de la puissance réfractive (pouvoir optique) cornéenne estimée, calculée en tenant compte de l'angle d'incidence croissant des rayons à distance du centre (lois de Snell), est encore plus marquée.*
*L'indice de réfraction minoré est utilisé dans les deux cas. La tendance au renforcement de la cambrure périphérique (asphéricité oblate) implique que l'angle d'incidence des rayons périphériques augmente plus vite que pour une cornée sphérique ou prolate. Ceci accentue l'aberration sphérique positive : les rayons périphériques sont réfractés vers un foyer plus proche (Fp) que les rayons centraux, réfractés vers F. Les flèches vertes indiquent l'emplacement où est effectuée la mesure par kératométrie simulée. Chez un patient opéré de chirurgie réfractive (cornée oblate), la surestimation du pouvoir optique cornéen central estimée par une technique de mesure de puissance kératométrique apicale peut atteindre plusieurs dioptries, comme dans cet exemple. C'est une cause classique d'erreur de calcul biométrique de puissance d'implant en chirurgie de la cataracte après chirurgie réfractive.*

Les cartes de front d'onde cornéen permettent d'étudier de manière précise l'effet de certaines pathologies comme le kératocône (Fig. 5.16) sur la qualité optique de la cornée.

## Aberration sphérique cornéenne

La puissance optique de l'implant pseudophake utilisé pour le remplacement du cristallin en chirurgie de la cataracte est en général calculée lors de la biométrie pour induire une réfraction postopératoire bénéfique pour le patient (emmétropisation ou myopisation légère selon les cas) grâce à une formule biométrique paraxiale, où l'on ne considère que le trajet des rayons lumineux qui traversent le centre de la cornée (et de l'implant). La cornée est assimilée à une surface optique sphérique dont le rayon correspond à la valeur de la kératométrie centrale moyenne introduite dans le logiciel de saisie de l'échobiomètre. Ainsi, les implants pseudophakes classiques biconvexes sphériques ne sont conçus que pour la restitution d'une bonne qualité optique quand le diamètre de la pupille est petit (en rapport avec des conditions d'éclairage photopiques) et concentrique à l'optique (implant bien centré). Autrement dit, le « comportement optique » de l'implant dans des conditions différentes (mésopiques ou scotopiques) n'est pas pris en compte.

La géométrie sphérique des implants pseudophakes « classiques » est source d'aberration sphérique positive, alors que le cristallin d'un sujet jeune génère un taux modéré d'aberration sphérique négative pour réduire le taux d'aberration sphérique positive total oculaire [6].

L'addition de l'aberration sphérique positive de l'implant et de la cornée est à l'origine de l'élévation de l'aberration sphérique oculaire positive que l'on peut mesurer en postopératoire en ayant recours à un aberromètre.

L'aberration sphérique d'un système optique induit une diminution de son stigmatisme. Si l'aberration sphérique est la seule aberration monochromatique présente, l'image d'un point dans le plan image n'est plus celle d'un point mais d'une tâche circulaire faite de cercles de diffusion concentriques (Fig. 5.17). Il n'y a donc pas de foyer de focalisation unique, les rayons lumineux convergent le long de l'axe optique dans une région comprise entre deux foyers dont l'écartement permet de quantifier le taux d'aberration sphérique longitudinale. Quand l'aberration sphérique est modérée, elle peut accroître la profondeur de champ d'un système optique. Un taux plus élevé d'aberration sphérique peut ainsi conférer une multifocalité à un système optique. Cette propriété peut être mise à profit pour réaliser un implant ou une lentille multifocale.

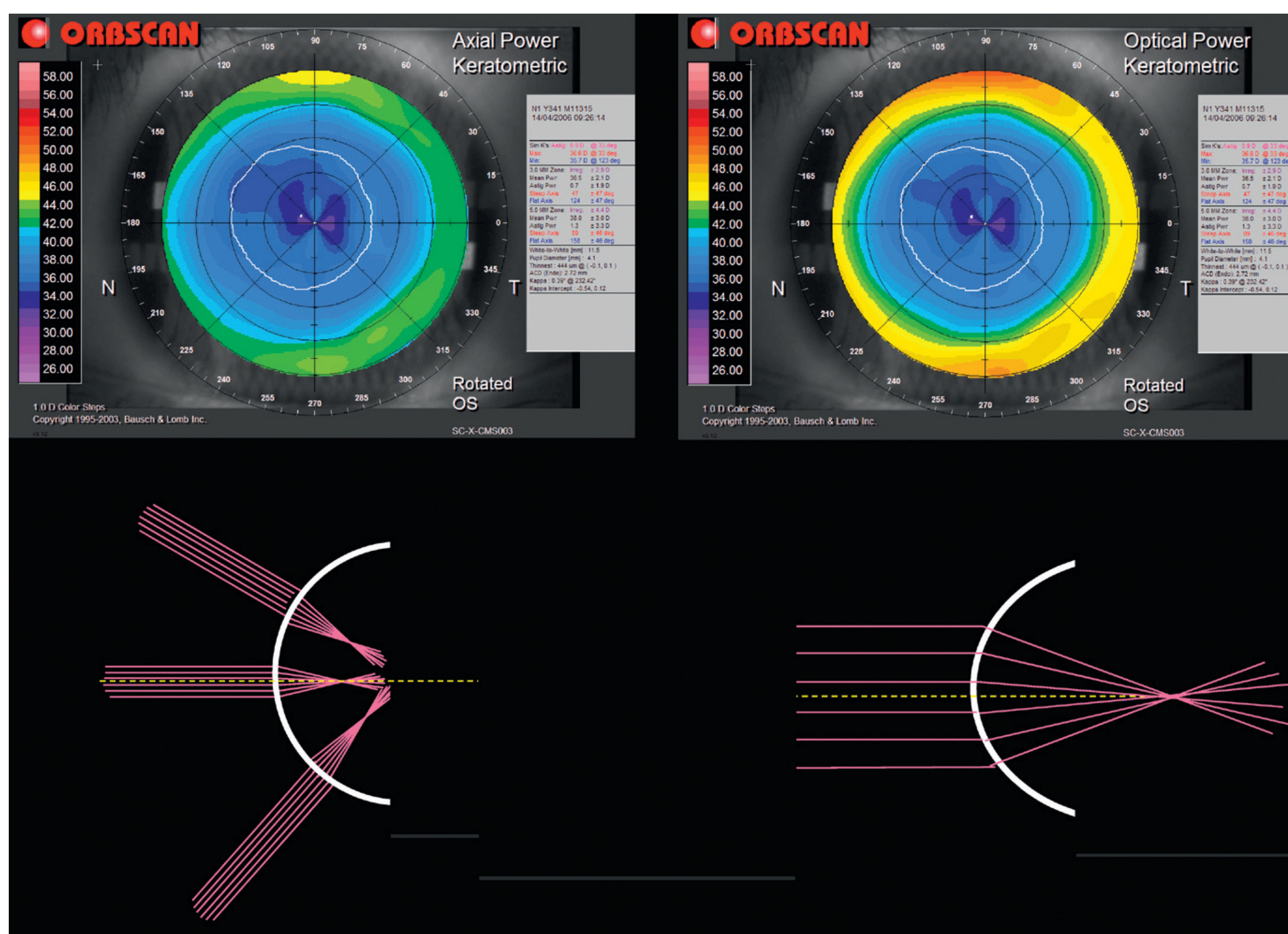



**Fig. 5.13. *Représentation topographique de la cornée d'un patient après Lasik myopique.***
*La carte de gauche représente la courbure axiale exprimée en dioptries (carte de puissance kératométrique) et la carte de droite correspond à la puissance optique (calculée selon les lois de Snell, avec les seules données de la face antérieure et un indice de réfraction minoré). Dans la région apicale, les valeurs numériques fournies par ces deux cartes sont quasiment identiques. La carte de courbure axiale montre une asphéricité oblate car la courbure axiale augmente globalement du centre vers la périphérie. On note une augmentation plus rapide sur la carte de la puissance optique en allant vers la périphérie de la surface cornéenne. L'échelle exprimée en dioptries (indice kératométrique) est de bornes et de pas identique pour les deux cartes.*

De même, la présence d'un taux élevé d'aberrations optiques de haut degré (aberration sphérique, coma, etc.) a pour corollaire inévitable une « dispersion » de l'information lumineuse incidente. La réduction de la transmission des contrastes est proportionnelle à la valeur absolue du taux d'aberrations optiques de haut degré et du diamètre pupillaire considéré.

En fonction de leur taux, les aberrations sphériques et de coma provoquent une dégradation de la fonction visuelle qui peut se traduire par la mesure objective d'une réduction de la sensibilité aux contrastes, voire l'apparition de plaintes fonctionnelles diverses (diplopie monoculaire, impression d'écho autour des sources lumineuses, difficulté d'adaptation à l'obscurité).

L'enjeu principal des implants monofocaux « asphériques » est de mieux mimer le comportement optique du cristallin jeune transparent (non accommodant) afin de restaurer une fonction visuelle de meilleure qualité chez les patients opérés de cataracte. Le mécanisme utilisé est la réduction du taux d'aberration sphérique oculaire total : l'aberration sphérique positive de la cornée est alors partiellement ou totalement neutralisée par l'aberration sphérique négative induite par l'implant, dont la géométrie est conçue de manière à ce que la puissance de l'optique décroisse vers sa périphérie. Certains implants asphériques sont neutres en matière d'aberration sphérique (implants dits *aberration free*), cette caractéristique les rend plus insensibles au tilt et au décentrement (moindre induction de coma).

**Fig. 5.15. *Principe de « réversibilité » du trajet de la lumière.***
*À gauche : calcul du front d'onde total. Les rayons sont matérialisés par des traits blancs, le front d'onde est en rose, et son profil est représenté à plusieurs endroits sur le trajet de propagation. La mesure du front d'onde suppose la réversibilité du trajet de la lumière : tout se passe comme si la lumière quittait le foyer, et voyageait « à l'envers » au travers de la cornée. La mesure topographique permet de prédire la distance focale théorique de la cornée (donnée par la puissance kératométrique apicale). Le calcul du front d'onde cornéen total suppose un « lancer de rayons » rétrograde, depuis ce foyer à travers la cornée, sur le diamètre d'analyse souhaité. Le front d'onde qui émergerait de cette cornée est plan pour une cornée « idéale », mais présente une distorsion pour une cornée présentant des aberrations. À droite : le front d'onde cornéen peut être caractérisé à partir de la distribution de ses écarts au front d'onde idéal plan. Ces écarts correspondent à des déphasages et sont de l'ordre du micron (la longueur d'onde moyenne de la lumière dans le visible est de 0,5 µm). La valeur de chacun des écarts mesurés est élevée au carré, puis une somme de ces carrés est effectuée. Cette somme est ensuite moyennée (on la divise par la surface mesurée). Le taux RMS correspond à la racine carrée de cette moyenne, et s'exprime en microns.*

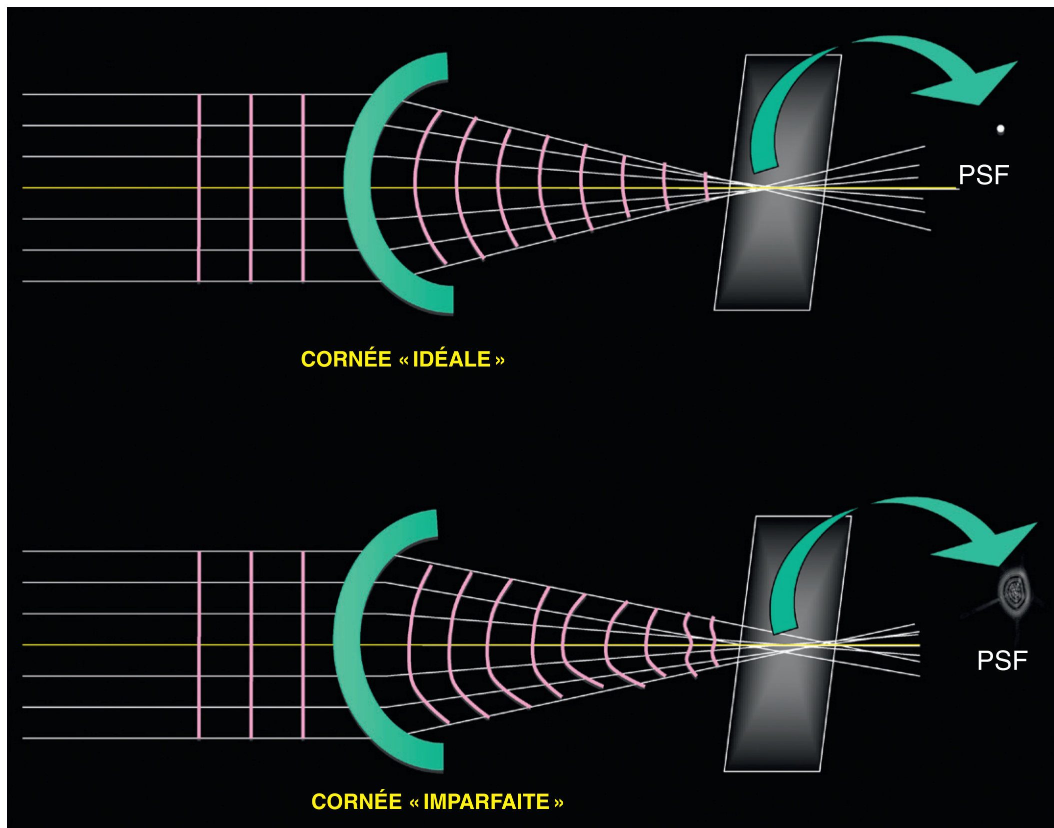



***Fig. 5.14.* Comparaison entre une cornée « idéale », dépourvue d'aberrations (en haut) et une cornée « imparfaite », qui génère un certain taux d'aberrations de haut degré (en bas).**
*Dans le cas de la cornée « idéale », le front d'onde incident (plan), qui est émis par un point source lointain, est réfracté par la cornée en un front d'onde de géométrie sphérique (circulaire en coupe). Les rayons lumineux montrent la propagation locale des ondes lumineuses : ils sont perpendiculaires à l'enveloppe du front d'onde. La géométrie de cette figure fait qu'il existe un plan où les ondes lumineuses convergent et se renforcent en un point où, arrivées « en phase », elles interfèrent toutes constructivement. Toute l'intensité lumineuse est concentrée en ce point : le stigmatisme est rigoureux (l'image d'un point est un point – on néglige les effets de la diffraction). Dans le cas d'une cornée « imparfaite », le front d'onde incident est réfracté par la cornée en un front d'onde dont la géométrie se départit d'une sphère. Les rayons ne convergent pas tous en un même point (les ondes lumineuses n'interfèrent pas toutes constructivement). L'image du point source est plus étalée. La fonction qui décrit la manière dont l'énergie lumineuse est répartie dans le plan focal est appelée* Point Spread Function *(PSF).*

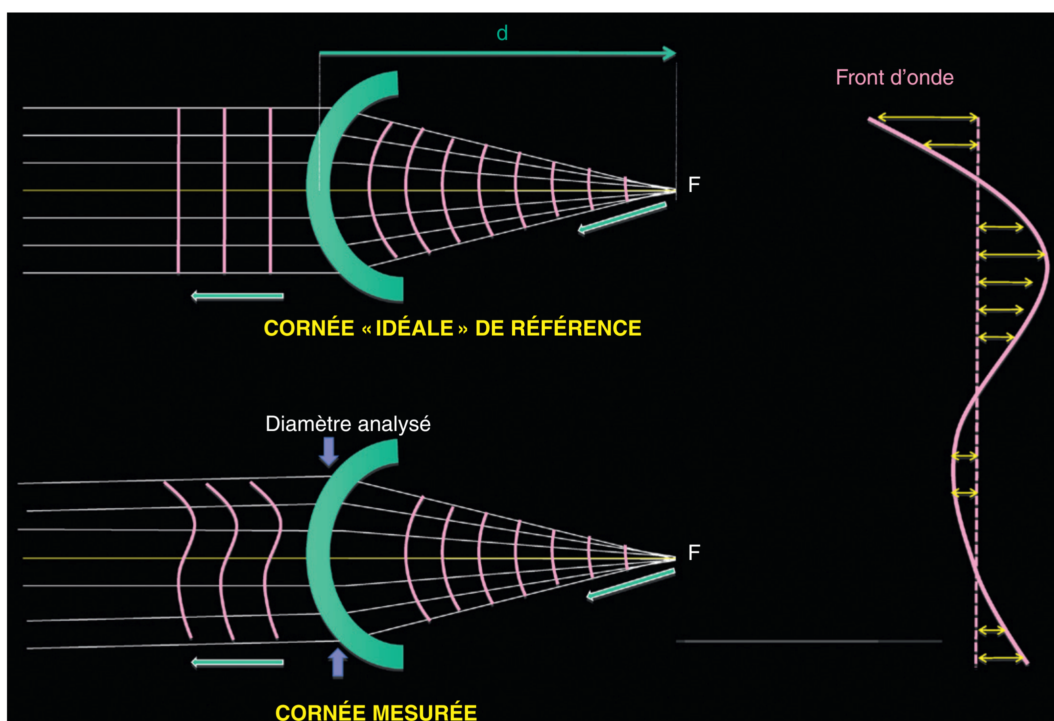


***Fig. 5.16.** Carte de front d'onde cornéen total pour une cornée atteinte de kératocône (topographe Galilei, Ziemer).*
*En bas à gauche, le front d'onde est représenté sur le diamètre analysé (6 mm). En haut à gauche, les aberrations qui contribuent à la déformation du front d'onde sont représentées et quantifiées par leur taux RMS. Le taux de coma vertical est très élevé (-2,49 µm pour 6 mm), en raison de l'asymétrie du relief cornéen causée par le kératocône. L'échelle est en microns. En bas à droite, la puissance cornéenne totale est représentée en dioptries, et le taux d'aberrations optique est exprimé en équivalent dioptrique (en haut).*

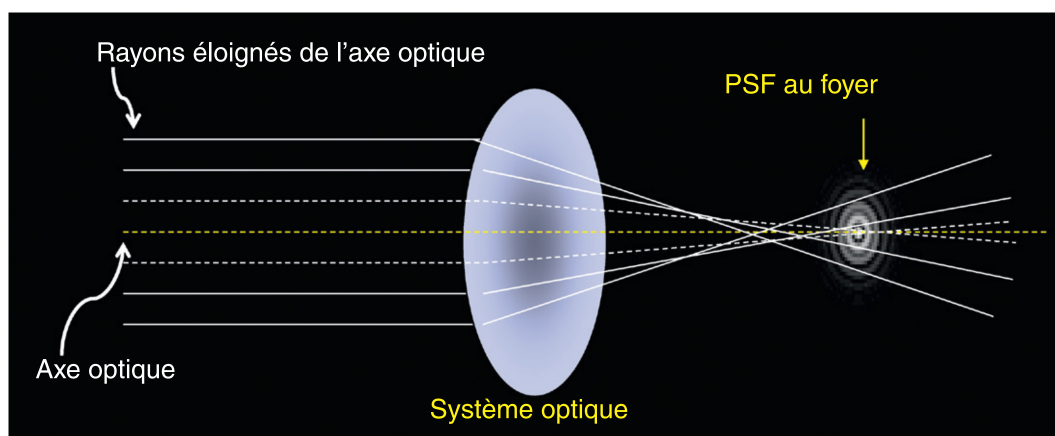
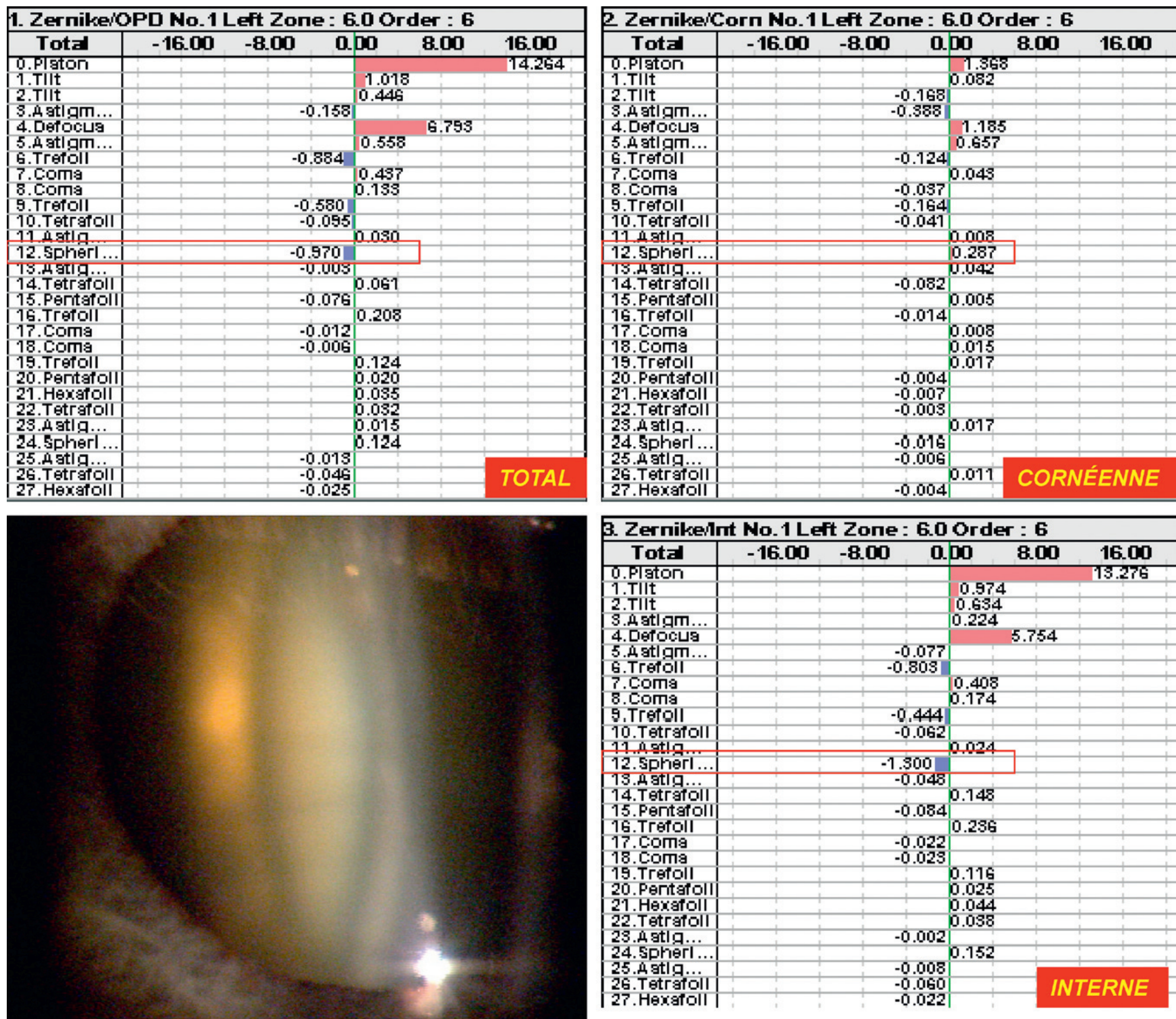



***Fig. 5.17.** Aberration sphérique d'un dioptre sphérique pour une source lumineuse située sur l'axe optique « à l'infini ».*
*L'aberration sphérique positive correspond au fait que les rayons incidents éloignés de l'axe optique sont réfractés en avant de F (foyer principal). L'enveloppe des rayons réfractés (représentée en pointillés) est appelée caustique. La PSF est élargie de manière symétrique. Cf. également la Fig. 5.2.*



1. Zernike/OPD No.1 Left Zone : 6.0 Order : 6 — TOTAL

| Total | -16.00 -8.00 0.00 8.00 16.00 |
|---|---|
| 0.Piston | 14.264 |
| 1.Tilt | 1.018 |
| 2.Tilt | 0.446 |
| 3.Astigm… | -0.158 |
| 4.Defocus | 6.793 |
| 5.Astigm… | 0.558 |
| 6.Trefoil | -0.884 |
| 7.Coma | 0.437 |
| 8.Coma | 0.133 |
| 9.Trefoil | -0.580 |
| 10.Tetrafoil | -0.095 |
| 11.Astig… | 0.030 |
| 12.Spheri… | -0.970 |
| 13.Astig… | -0.003 |
| 14.Tetrafoil | 0.061 |
| 15.Pentafoil | -0.076 |
| 16.Trefoil | 0.208 |
| 17.Coma | -0.012 |
| 18.Coma | -0.006 |
| 19.Trefoil | 0.124 |
| 20.Pentafoil | 0.020 |
| 21.Hexafoil | 0.035 |
| 22.Tetrafoil | 0.032 |
| 23.Astig… | 0.015 |
| 24.Spheri… | 0.124 |
| 25.Astig… | -0.013 |
| 26.Tetrafoil | -0.046 |
| 27.Hexafoil | -0.025 |

2. Zernike/Corn No.1 Left Zone : 6.0 Order : 6 — CORNÉENNE

| Total | -16.00 -8.00 0.00 8.00 16.00 |
|---|---|
| 0.Piston | 1.368 |
| 1.Tilt | 0.082 |
| 2.Tilt | -0.168 |
| 3.Astigm… | -0.388 |
| 4.Defocus | 1.185 |
| 5.Astigm… | 0.657 |
| 6.Trefoil | -0.124 |
| 7.Coma | 0.043 |
| 8.Coma | -0.037 |
| 9.Trefoil | -0.164 |
| 10.Tetrafoil | -0.041 |
| 11.Astig… | 0.008 |
| 12.Spheri… | 0.287 |
| 13.Astig… | 0.042 |
| 14.Tetrafoil | -0.082 |
| 15.Pentafoil | 0.005 |
| 16.Trefoil | -0.014 |
| 17.Coma | 0.008 |
| 18.Coma | 0.015 |
| 19.Trefoil | 0.017 |
| 20.Pentafoil | -0.004 |
| 21.Hexafoil | -0.007 |
| 22.Tetrafoil | -0.003 |
| 23.Astig… | 0.017 |
| 24.Spheri… | -0.016 |
| 25.Astig… | -0.006 |
| 26.Tetrafoil | 0.011 |
| 27.Hexafoil | -0.004 |

3. Zernike/Int No.1 Left Zone : 6.0 Order : 6 — INTERNE

| Total | -16.00 -8.00 0.00 8.00 16.00 |
|---|---|
| 0.Piston | 13.276 |
| 1.Tilt | 0.974 |
| 2.Tilt | 0.634 |
| 3.Astigm… | 0.224 |
| 4.Defocus | 5.754 |
| 5.Astigm… | -0.077 |
| 6.Trefoil | -0.803 |
| 7.Coma | 0.408 |
| 8.Coma | 0.174 |
| 9.Trefoil | -0.444 |
| 10.Tetrafoil | -0.062 |
| 11.Astig… | 0.024 |
| 12.Spheri… | -1.300 |
| 13.Astig… | -0.048 |
| 14.Tetrafoil | 0.148 |
| 15.Pentafoil | -0.084 |
| 16.Trefoil | 0.236 |
| 17.Coma | -0.022 |
| 18.Coma | -0.023 |
| 19.Trefoil | 0.116 |
| 20.Pentafoil | 0.025 |
| 21.Hexafoil | 0.044 |
| 22.Tetrafoil | 0.038 |
| 23.Astig… | -0.002 |
| 24.Spheri… | 0.152 |
| 25.Astig… | -0.008 |
| 26.Tetrafoil | -0.060 |
| 27.Hexafoil | -0.022 |

***Fig. 5.18. Relevé des aberrations totales, cornéennes, et calcul des aberrations internes chez une patiente présentant une cataracte nucléaire de l'œil gauche (topographe-aberromètre OPDscan, Nidek).***
*L'aberration sphérique totale (ligne 12 du relevé d'aberrations) mesurée par aberrométrie est franchement négative pour l'œil entier, alors que le taux d'aberration sphérique cornéen (calculé d'après la mesure topographique de la face antérieure) est légèrement positif. Seul ce taux est à considérer pour le choix d'un implant asphérique.*

La mesure de l'aberration sphérique cornéenne permet au chirurgien désireux de réduire l'aberration sphérique positive de l'œil opéré (ou de ne pas l'accentuer) de choisir un implant asphérique en fonction du taux d'aberration sphérique négative souhaité.

L'aberration sphérique cornéenne correspond principalement à la valeur du coefficient RMS affecté au polynôme Z40. Cette valeur dépend du diamètre d'analyse. Pour un diamètre de 6 mm, cette valeur RMS varie généralement entre 0 et +0,3 µm pour les cornées saines non opérées. Elle devient plus positive après chirurgie de la myopie (géométrie oblate du pourtour cornéen), mais peut devenir négative après chirurgie de l'hypermétropie ou au cours de l'évolution de certains kératocônes (accentuation de l'asphéricité prolate de la cornée).

Avant chirurgie de la cataracte, il est important de mesurer l'aberration sphérique cornéenne, et non totale, car l'opacification du noyau cristallinien peut provoquer une élévation de l'aberration sphérique d'origine cristallinienne (Fig. 5.18). Ces principes s'appliquent aussi pour la toricité cornéenne, qui seule (indépendamment d'un éventuel astigmatisme interne associé) doit guider le calcul de la puissance cylindrique d'un implant pseudophake torique.

## Applications cliniques

– L'utilisation des cartes de front d'onde permet de comparer la qualité optique de différentes cornées, ou d'en suivre l'évolution pour un même œil.

– Les aberromètres permettent de construire le front d'onde oculaire total, qui englobe les effets de la totalité des dioptres oculaires. Les aberromètres munis d'un système topographique (OPDscan, iTrace) utilisent le calcul des aberrations cornéennes pour étudier l'effet des « dioptres internes », qui est calculé en soustrayant au front d'onde oculaire total le front d'onde cornéen.

## Zone optique fonctionnelle

En chirurgie photoablative, la qualité optique de l'œil opéré dépend de divers facteurs dont l'efficacité de la correction de l'amétropie sphérocylindrique, le maintien de la transparence des milieux, et la taille de la zone optique de l'œil opéré. En raison de la nécessité de préserver une certaine épaisseur de mur cornéen résiduel (Lasik), ou prévenir la survenue d'un haze (PKR : *Photorefractive Keratectomy*), le chirurgien doit restreindre le diamètre de la zone optique programmée lors de la correction photoablative à une valeur généralement comprise entre 5,5 et 7 mm. En pratique, la taille et le centrage de la zone optique sur laquelle la totalité de la correction programmée est accomplie dépendent non seulement des paramètres choisis pour la chirurgie (zone optique programmée, zone de transition, etc.), mais aussi de facteurs liés à la régression cicatricielle et aux effets biomécaniques induits par la chirurgie.

La zone optique fonctionnelle (ZOF) représente la surface où la correction programmée a été obtenue ; grâce à celle-ci, les rayons lumineux réfractés et issus d'une source ponctuelle contribuent à la formation d'une image fovéale elle-même ponctuelle (cette zone maintient la qualité du stigmatisme). Autrement dit, la zone optique fonctionnelle est une région de la surface cornéenne contribuant à la formation de l'image fovéale, au sein de laquelle le taux d'aberrations optiques de haut degré est faible et n'augmente pas. Les dimensions de la zone optique fonctionnelle ne peuvent qu'être estimées par la topographie ; par exemple, on peut définir la zone optique fonctionnelle comme celle où la puissance optique cornéenne (et non la courbure) demeure égale ou proche (moins d'une demi-dioptrie d'écart) avec la puissance optique paraxiale.

Pour induire une bonne qualité optique, la zone optique fonctionnelle doit « couvrir » l'intégralité de la pupille d'entrée ; par définition, l'ensemble des rayons traversant le disque pupillaire doivent avoir été préalablement réfractés au sein de la ZOF s'ils veulent converger vers un même point image. En raison du trajet convergent de ces rayons réfractés par la cornée, la puissance cornéenne doit être corrigée sur un diamètre supérieur au diamètre « anatomique » de la pupille irienne pour permettre un bon stigmatisme (Fig. 5.19). La réfringence cornéenne explique d'ailleurs que le diamètre pupillaire estimé à l'examen direct est supérieur d'environ 20 % au diamètre pupillaire anatomique.

En utilisant un aberromètre permettant le recueil du front d'onde oculaire total, on peut estimer si le diamètre de la ZOF induite par la chirurgie réfractive est suffisant, en étudiant la réfraction de l'œil entier dans le plan de la pupille irienne. Ce type de carte, légendé en dioptries d'erreur réfractive, est plus facile à interpréter qu'une carte de front d'onde, car il montre l'effet des aberrations de bas et/ou haut degré sur la réfraction des rayons lumineux au sein de la pupille d'entrée. Il est analogue à la carte de puissance réfractive cornéenne, mais comprend les effets conjugués de la

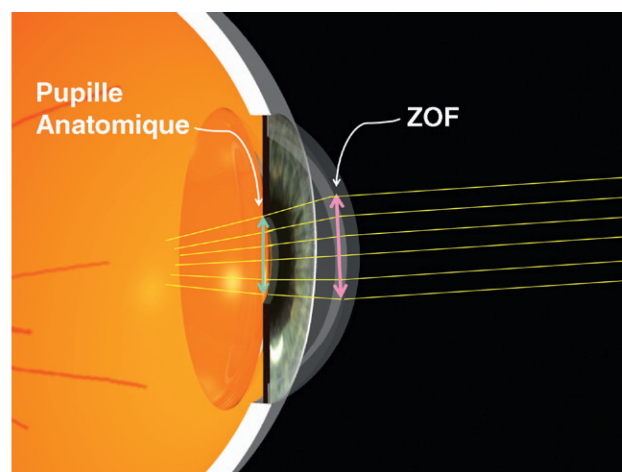



***Fig. 5.19.*** ***Représentation schématique des rapports entre zone optique fonctionnelle et pupille anatomique, pour un œil dont la puissance cornéenne est constante (le point source est situé « à l'infini »).***
*En raison de la réfraction par le dioptre cornéen et de l'inclinaison des rayons lumineux, le diamètre de la ZOF est toujours supérieur à celui de la pupille anatomique. Si le diamètre de la ZOF est proportionnel à celui de la pupille anatomique, il augmente également avec la profondeur de la chambre antérieure et la puissance cornéenne.*

cornée et du cristallin. Une augmentation (ou réduction) rapide et concentrique de la puissance réfractive vers les bords du disque pupillaire traduit la présence d'aberration sphérique oculaire positive (ou négative) (Fig. 5.20). Une variation rapide de puissance répartie de manière asymétrique correspond généralement à la présence d'une aberration oculaire de coma (ex : décentrement) (Fig. 5.21). La position relative de la pupille irienne vis-à-vis de la cornée pouvant varier d'un sujet à l'autre et chez un même sujet en fonction des conditions de luminosité ambiante, seule l'étude exhaustive des propriétés optiques oculaires (relevé aberrométrique) est à même de renseigner sur la réalité fonctionnelle d'un décentrement ou d'une zone optique fonctionnelle de diamètre insuffisant. Il est important de réaliser l'examen en conditions de faible éclairage, pour mimer une ambiance lumineuse mésopique (dilatation pupillaire physiologique). En l'absence d'anomalie cristallinienne (cataracte nucléaire, subluxation, etc.), si la réfraction est globalement constante au sein du disque pupillaire, c'est que le diamètre de la zone optique fonctionnel est suffisant. Autrement dit, l'aberration sphérique positive (et/ou l'aberration de type coma en cas de centrage suboptimal) n'augmente pas de manière significative pour un diamètre pupillaire mésopique. À l'inverse, en cas de plaintes fonctionnelles telles qu'une impression de baisse de la perception des contrastes ou l'apparition de halos lumineux en conditions mésopiques après chirurgie cornéenne démyopisante, l'obtention d'une ZOF de diamètre insuffisant peut être objectivée par la constatation d'une augmentation de la puissance réfractive vers les bords du disque pupillaire (Fig. 5.20).

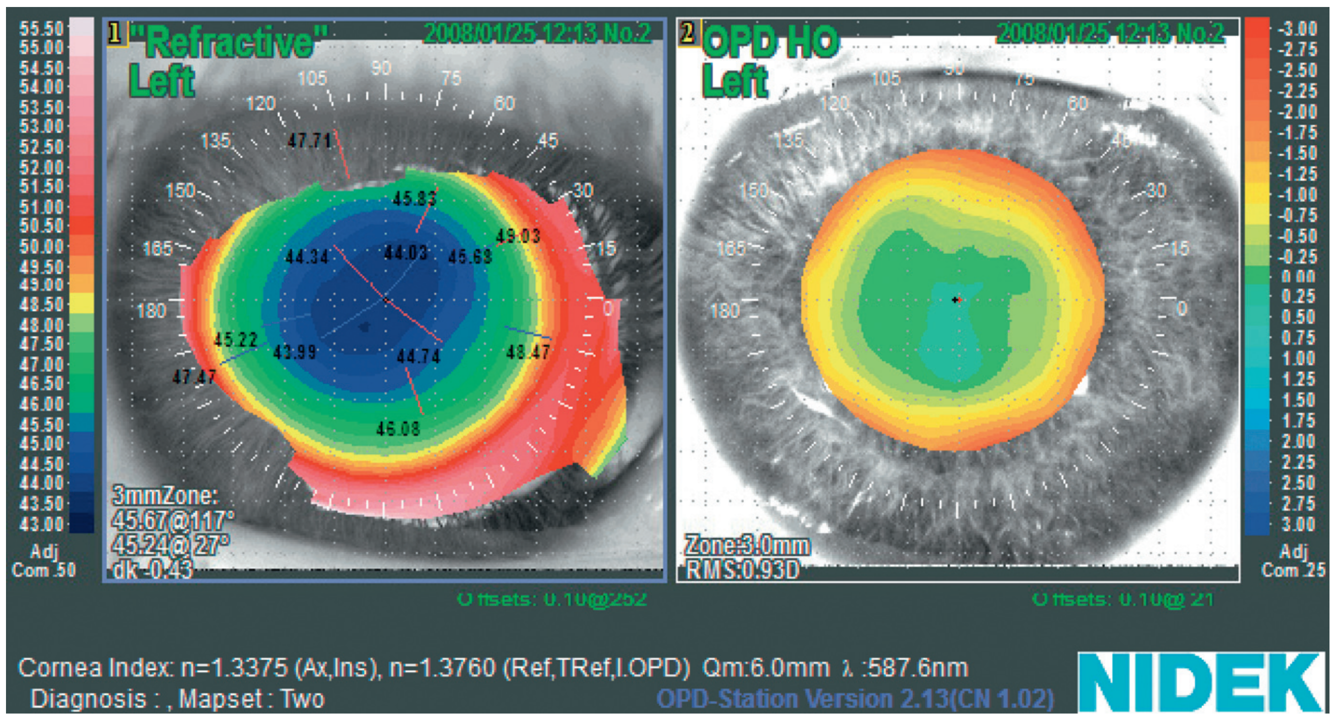



**Fig. 5.20. Comparaison entre une carte de puissance réfractive (à gauche) et une carte de puissance réfractive oculaire totale pour la meilleure correction mesurée (à droite, carte OPD HO) grâce à un aberromètre/topographe (OPDscan, Nidek).**
*Le patient a été opéré de Lasik pour une myopie préopératoire de -5 D. Il signale la présence de halos lumineux nocturnes. L'examen a été effectué en conditions mésopiques, pour un diamètre pupillaire mesuré à 5,45 mm dans ces conditions. La carte de puissance oculaire totale est une carte de puissance dioptrique, dont les limites sont celles du disque pupillaire ; celle d'un œil parfaitement emmétrope sur la totalité de ce disque serait de couleur uniformément verte. Les variations colorimétriques traduisent donc des fluctuations de puissance réfractive locale. On note sur la carte de puissance oculaire un anneau périphérique de couleurs chaudes et qui révèle une augmentation de la puissance réfractive oculaire totale ; la zone optique fonctionnelle obtenue possède un diamètre légèrement insuffisant pour procurer une réfraction uniforme à la pupille. Dans cet exemple, la surface correspondant à la ZOF est colorée en vert (0 dioptrie d'erreur réfractive). L'analyse du taux des aberrations optiques de haut degré révèle la présence d'aberration sphérique positive.*

Ainsi, l'évaluation précise de la ZOF doit reposer sur une représentation fonctionnelle des propriétés cornéennes (carte de puissance réfractive) couplée au recueil des données aberrométriques.

# Conclusion

Ce chapitre souligne les différences subtiles mais fondamentales entre les différents modes de représentation utilisés en topographie cornéenne. L'utilisation de dioptries « de courbure » est d'usage en ophtalmologie, au prix parfois d'une certaine confusion. Il est essentiel de maîtriser ces concepts pour comprendre les difficultés rencontrées dans le calcul de la puissance optique des implants pseudophakes chez les patients opérés de chirurgie réfractive cornéenne. La reconstruction du front d'onde cornéen permet l'étude fine des propriétés optiques du dioptre cornéen. Seule l'utilisation conjointe de données aberrométriques permet d'estimer réellement la contribution cornéenne à la qualité optique de l'œil entier.

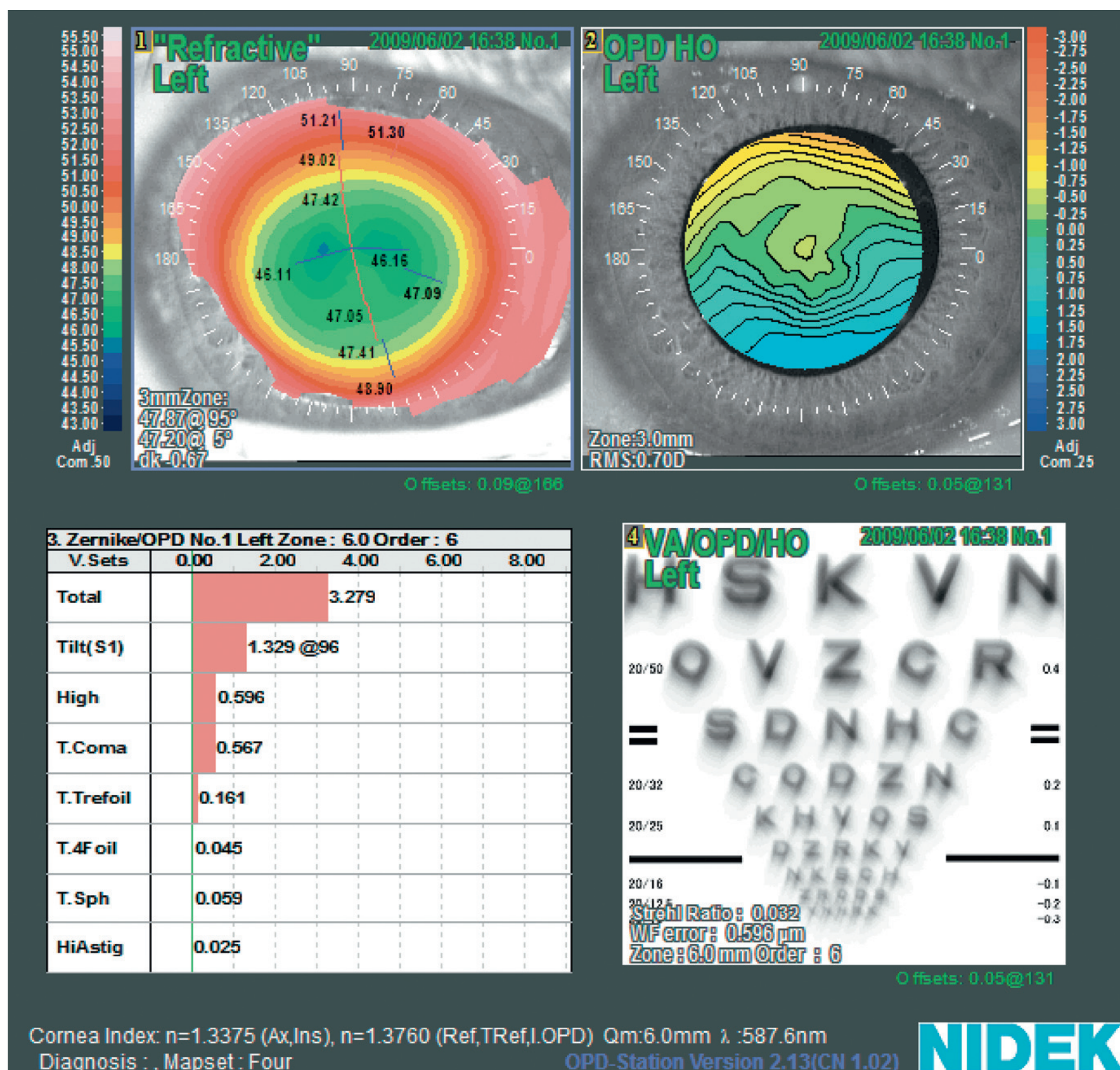



***Fig. 5.21.*** ***Patiente de 28 ans opérée de Lasik pour une myopie de -3 D.***
*En postopératoire immédiat, l'acuité visuelle non corrigée est de 10/10, mais la patiente se plaint d'une sensation de flou visuel permanent, et décrit une diplopie monoculaire verticale de l'œil gauche. Un examen topo-aberrométrique est effectué (OPDscan, Nidek). La topographie cornéenne en mode de « puissance réfractive » (en haut à gauche) montre la présence d'une zone optique relativement centrée, mais l'utilisation de l'aberrométrie révèle l'existence d'un gradient de puissance vertical sur la carte de puissance réfractive oculaire (en haut à droite, les contours de chacune des zones correspondant à une puissance réfractive distincte ont été surlignés). Ce gradient traduit l'existence d'un décentrement inférieur de la photoablation, qui entraîne une élévation des aberrations oculaires de type coma (en bas à gauche, histogramme des aberrations optiques de l'œil entier). L'utilisation de ces données permet au logiciel de l'appareil d'effectuer une « simulation » de l'image rétinienne d'une planche d'optotypes.*

## Références


[1] Sampson WG. Applied optical principles : keratometry. Ophthalmology 1979 ; 86 (3) : 347–51.
[2] Salmon TO, Horner DG. Comparison of elevation, curvature, and power descriptors for corneal topographic mapping. Optom Vis Sci 1995 ; 72 (11) : 800–8.
[3] Lteif Y, Gatinel D. Calcul de la puissance de l'implant intraoculaire après chirurgie réfractive cornéenne. J Fr Ophtalmol 31(3) : 326–34.
[4] Alimisi S, Miltsakakis D, Klyce S. Corneal topography for intraocular lens power calculations. J Refract Surg 1996 ; 12 (2) : S309–11.
[5] Guirao A, Artal P. Corneal wave aberrations from videokeratography : accuracy and limitations of the procedure. J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis 2000 ; 17 (6) : 955–65.
[6] Artal P, Guirao A. Contributions of the cornea and lens to the aberrations of the human eye. Opt Lett 1998 ; 23 : 1713–5.
[7] Gatinel D. Analyse du front d'onde oculaire. EMC ophtalmologie 2009 ; 21-200-A-17.

Chapitre 6

# Principes des cartes topographiques d'élévation

Contrairement à la topographie spéculaire, qui fournit des informations sur sa courbure, la topographie d'élévation permet de recueillir des informations directement relatives à la morphologie cornéenne, c'est-à-dire au relief spatial de la surface cornéenne.

La topographie d'élévation est un important outil diagnostique, complémentaire à la topographie spéculaire de courbure. Elle permet d'accéder à l'étude de la face postérieure de la cornée et fournit des informations sur l'épaisseur cornéenne (pachymétrie optique), qui est déduite de la distance entre les surfaces antérieures et postérieures. Sa généralisation relativement récente a été favorisée par l'essor de la chirurgie réfractive, où elle est particulièrement utile pour la planification de la chirurgie photoablative cornéenne, ainsi que le dépistage des contre-indications au Lasik (kératocône infraclinique) [1].

# Définition de l'élévation

L'élévation en topographie cornéenne fait simplement référence à la distance au-dessus ou en dessous de laquelle se situent les points de la surface cornéenne, vis-à-vis d'une surface de référence *calculée*.

Les données traitées en topographie d'élévation sont directement les coordonnées spatiales de la surface analysée, et non celles de sa courbure locale. La cornée y est assimilée à un maillage dont les points possèdent une abscisse X, une ordonnée Y et une coordonnée d'élévation (Z) (Fig. 6.1). La coordonnée Z dépend de la surface de référence choisie (celle-ci fournit le « niveau zéro » de l'élévation).

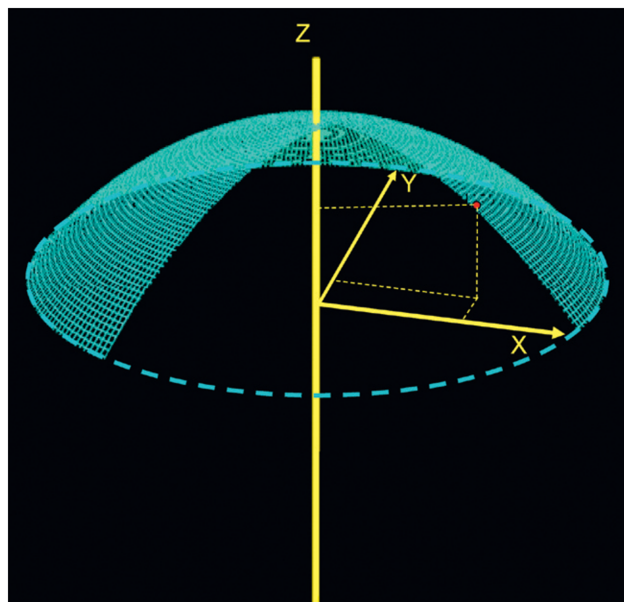



***Fig. 6.1. La topographie d'élévation permet d'appréhender le relief de l'élévation de la surface étudiée (antérieure ou postérieure).***
*Les données « brutes » recueillies par les systèmes d'analyse (caméra Scheimpflug, balayage par fente, etc.) correspondent à une valeur d'élévation absolue (Z) pour chaque couple de points (X, Y) situés dans le disque plan couvrant le diamètre d'analyse (en général proche de 10 mm). Ces coordonnées sont représentées ici en projection sur les axes (X, Y, Z) pour un point figuré en rouge. À ce stade, la surface de référence n'est pas encore calculée.*

Les données d'élévation cornéenne peuvent théoriquement être calculées à partir des données de courbure (technologie de réflexion spéculaire) [2], ou acquises de manière plus directe en utilisant les images numérisées du balayage d'une fente lumineuse, d'une caméra rotative Scheimpflug (Fig. 6.2) ou encore par une technique de stéréographie par trame.

L'acquisition directe (indépendante de la technologie par réflexion spéculaire type Placido) est plus fiable car elle n'est pas influencée par l'interpolation mathématique et/ou le lissage des données de courbure liées au nécessaire calcul d'intégration pour passer de la courbure à l'élévation.

Ce type d'acquisition directe fournit également des données d'élévation de la surface postérieure de la cornée, que les techniques de réflexion spéculaire ne peuvent analyser.

Les images des données brutes recueillies par le système de détection (camera Scheimpflug, détection de « fentes balayantes ») sont traitées par un procédé mathématique dédié (ex : triangulation) en vue de la reconstruction tridimensionnelle de la géométrie des surfaces de la cornée. Ces surfaces encadrent le volume cornéen, ce qui permet d'établir un relevé pachymétrique « point par point » (Fig. 6.3).

Compte tenu de la divergence entre le diamètre total de la cornée (échelle millimétrique) et la variation de l'élévation qu'il faut décrire (échelle micronique), la représentation des variations fines de l'élévation ne peut pas être faite par rapport à une surface de référence (SR) horizontale arbitraire comme le plan limbique, ou le plan passant par le vertex de la cornée.

En topographie terrestre, le niveau moyen de la mer est commodément choisi comme celui la surface de référence habituelle et « niveau zéro ». Les terres situées sous

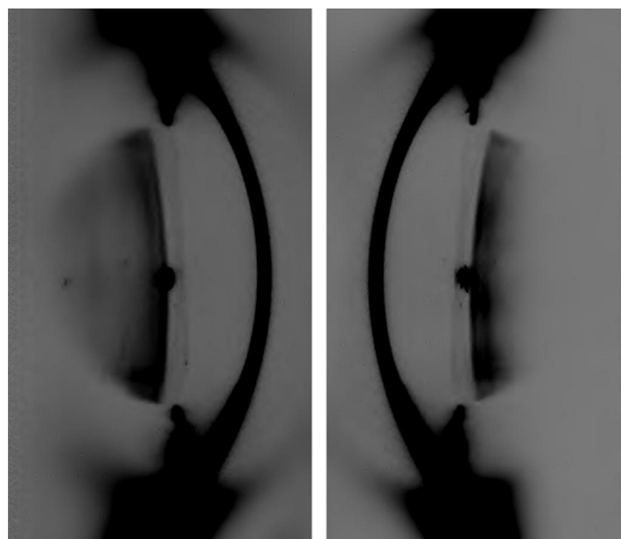


***Fig. 6.2. Images correspondant à des images acquises par le topographe Galilei (double camera Scheimpflug) pour la reconstitution du segment antérieur et la représentation en topographie d'élévation cornéenne antérieure et postérieure.***

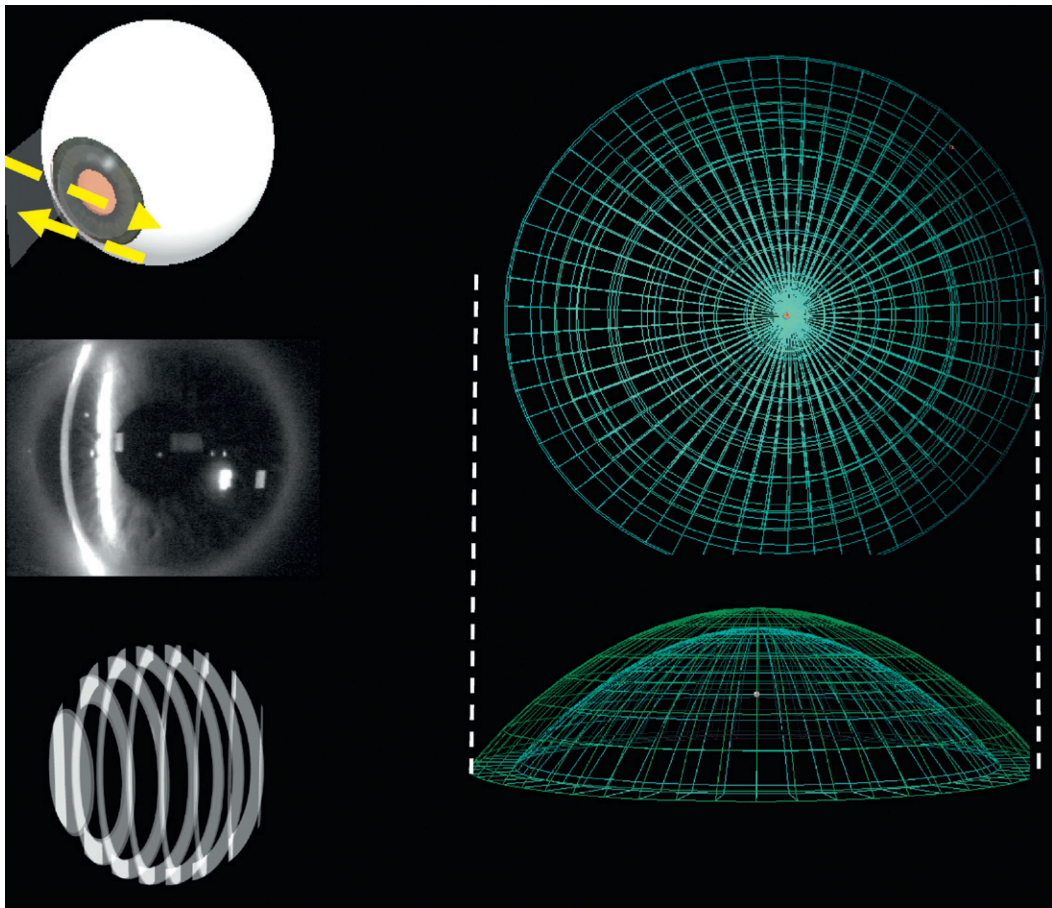


*Fig. 6.3.* ***Représentation de l'acquisition de l'élévation par la technologie du balayage par fentes (slit scanning).***
*Les images correspondant à une série de coupes de la cornée réalisées selon deux angles d'incidence sont capturées, puis numérisées (ces fentes sont représentées schématiquement en bas à gauche). Un algorithme utilisant un calcul de triangulation est utilisé pour reconstruire l'élévation des faces antérieures et postérieures de la cornée (à droite). Cet algorithme tient compte de la déflexion des rayons lumineux au travers de la face antérieure de la cornée.*

le niveau de la mer et les fosses sous-marines sont alors pourvues d'une élévation « négative ».

La représentation de l'élévation cornéenne suppose ainsi l'utilisation d'une surface de référence, par rapport à laquelle les différences d'élévation seront caractérisées. Afin de mettre en évidence les petites variations locales, la surface de référence doit épouser le profil global de la surface mesurée. La sphère est la surface choisie « par défaut » pour représenter l'élévation de la cornée.

La surface de référence doit être calculée : elle correspond à une surface géométrique caractérisée (ex : sphère) dont les points sont les plus proches de la surface analysée.

## Calcul de la sphère de référence

Une fois accomplie l'acquisition des données d'élévation, le logiciel du topographe doit calculer une sphère de référence en utilisant un algorithme approprié. Schématiquement, plusieurs sphères (de rayon et position variables – mode dit « flottant ») sont « testées » et pour chacune, le logiciel du topographe calcule la somme des distances élevées au carré entre chacun des points de la surface cornéenne mesurée et la sphère pressentie. La sphère retenue est celle pour laquelle la somme du carré des distances avec la surface cornéenne mesurée est la plus faible (Fig. 6.4). Élever au carré la distance mesurée permet à la fois d'annuler l'influence de la position (supérieure ou inférieure) du point mesuré par rapport à la sphère testée, et de donner un certain poids aux points les plus distants de la courbe testée.

Il faut calculer une sphère de référence pour la face antérieure de la cornée, et une autre sphère de référence pour la face postérieure de la cornée.

La valeur du rayon de la sphère de référence n'a pas de signification optique particulière, et ne correspond pas directement à la valeur de la kératométrie moyenne de la surface étudiée, même s'il est en général d'autant plus grand que la kératométrie moyenne est basse. L'asphéricité et le degré de toricité ou d'irrégularité de la surface cornéenne représentée influent également sur le rayon de la sphère de référence. Quand la surface cornéenne analysée est dominée par la toricité, le rayon de la sphère de référence tend à adopter une valeur

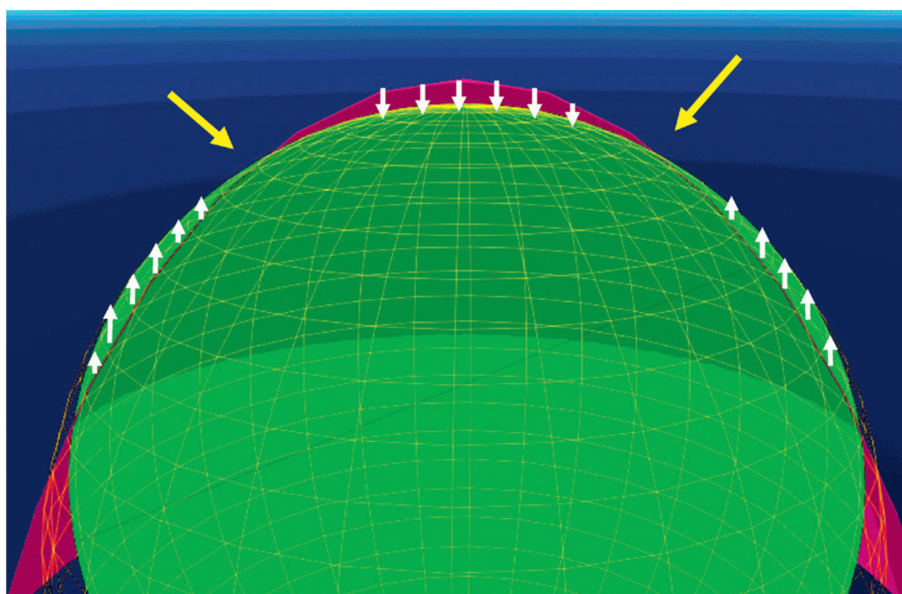


**Fig. 6.4.** ***Exemple de positionnement d'une sphère testée vis-à-vis de la surface cornéenne analysée.***
*Les flèches blanches représentent les écarts entre la surface et la sphère le long d'un méridien arbitraire. Noter également que certains points sont situés à l'intersection de la sphère et de la surface cornéenne (flèches jaunes).*

intermédiaire entre les valeurs respectives de courbure du méridien le plus plat et du méridien le plus cambré. De ce fait, les points situés le long des méridiens les plus plats seront plutôt situés au-dessus de la sphère, alors que ceux situés le long des méridiens les plus cambrés seront situés au-dessous. Un motif d'élévation en « croix » est alors obtenu (Fig. 6.5).

Compte tenu de la ressemblance grossière de la surface cornéenne avec une calotte sphérique, une sphère dite de référence (BFS : *Best Fit Sphere*) peut être calculée à partir des données brutes de l'élévation. Ce calcul est réalisé en choisissant un rayon et la localisation de la sphère permettant de minimiser le carré de la distance entre chacun des points de la cornée sur un diamètre considéré et la BFS.

La *Best Fit Sphere* est donc la sphère qui « épouse » au mieux l'ensemble de la surface cornéenne. La carte d'élévation montre son écart résiduel avec la surface cornéenne (Fig. 6.6).

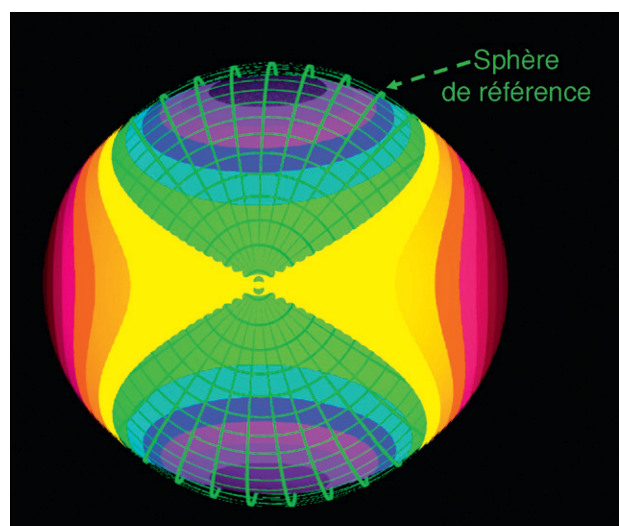



**Fig. 6.5.** ***Représentation en élévation d'une surface torique (méridien le plus cambré à 90°).***
*Les points situés le long des méridiens verticaux (couleurs froides, élévation négative) sont globalement situés « sous » la sphère de référence (symbolisée par le maillage vert) car ils sont « portés » par des méridiens dont la courbure est globalement supérieure à celle de la sphère. L'inverse est observé pour les points situés le long des méridiens le plus plats.*

## Rendu des cartes d'élévation

Après calcul de la sphère de référence sur un diamètre d'analyse donné, les données d'élévation sont rendues en utilisant une échelle de couleurs appropriée. Avec la plupart des topographes et par analogie avec les cartes terrestres d'élévation, les points au-dessus de la sphère (élévation positive) sont représentés en couleurs chaudes, allant du jaune au rouge foncé, tandis que les points situés au-dessous de la sphère (élévation négative) sont représentés en couleurs froides (du bleu ciel au violet). Les points situés au niveau de la sphère sont représentés en vert (« niveau zéro ») (Fig. 6.7a).

Ainsi, chaque carte devrait être considérée comme la représentation des « rapports » entre deux surfaces, dont l'une (la sphère de référence) est calculée pour épouser au mieux l'autre (la surface cornéenne étudiée). La sphère de référence est une « construction » virtuelle qui s'avère cependant très utile dans ce contexte (Fig. 6.7b).

Un tel rendu d'une carte d'élévation permet de visualiser la forme globale de la cornée, et ses variations locales. Par exemple, une zone « rouge » doit simplement être perçue comme « au-dessus » de la sphère de référence, non comme une zone cambrée (Fig. 6.8).

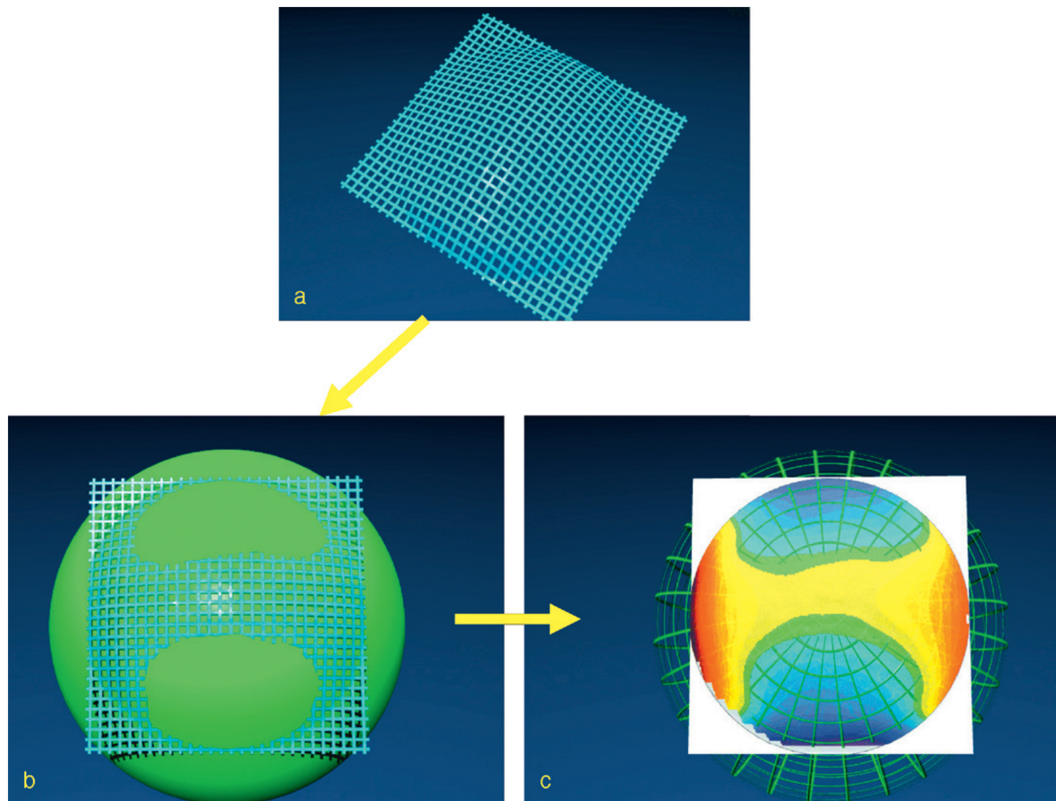
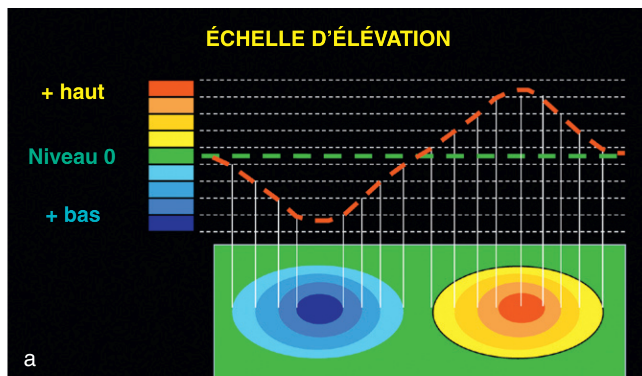



**Fig. 6.6. Représentation schématique de la séquence conduisant à la représentation en élévation de la surface de la cornée.**
*Une fois l'élévation acquise (a : la matrice des points recueillis est représentée en bleu), une sphère de référence est calculée (b). Une couleur est attribuée à chaque point en fonction de sa distance à la sphère de référence (c).*



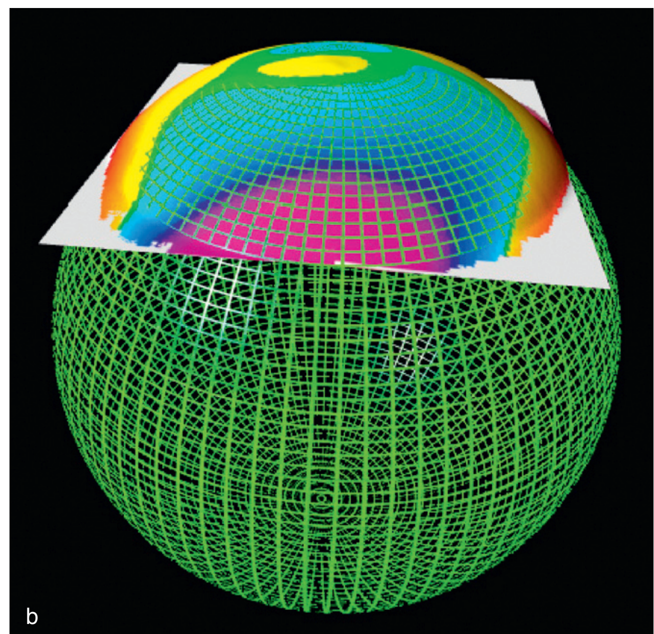




**Fig. 6.7. Rendu des cartes d'élévation.**
*a. Principe de l'échelle colorimétrique. L'unité habituelle est le micron. Chaque couleur correspond à un pas, le plus souvent égal à 5 µm par défaut. La couleur verte est alors attribuée aux points dont l'élévation est située à ± 2,5 µm de la surface de référence calculée. b. Représentation schématique en 3 dimensions d'une carte d'élévation théorique et de la sphère de référence calculée. Les parties situées au-dessus de la sphère sont colorées en couleurs chaudes, les parties situées au-dessous en couleurs froides. C'est ainsi que la topographie d'élévation doit être comprise.*

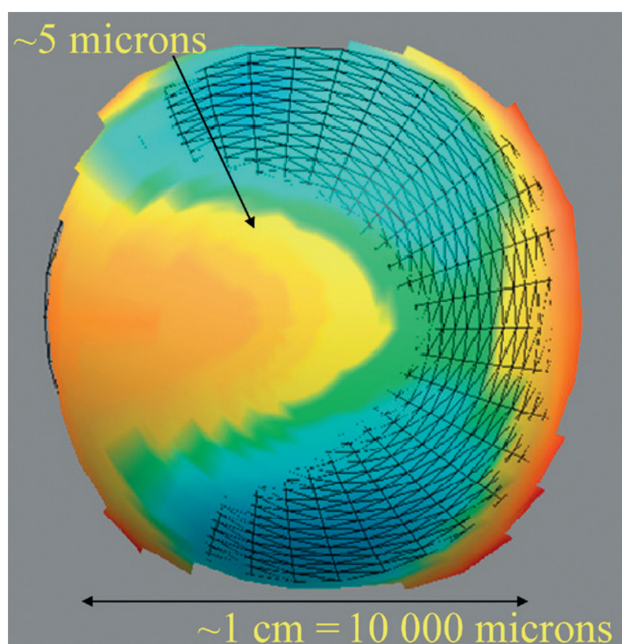



**Fig. 6.8. Représentation en élévation d'une surface antérieure de cornée normale.**
*Les disparités d'élévation vis-à-vis de la sphère de référence (maillage sombre) sont représentées par une couleur différente en fonction de leur valeur. Le pas de l'échelle est ici de 5 µm, et les points situés dans les zones colorées en jaune clair ont une élévation (distance) à la sphère comprise entre 2,5 et 7,5 µm. Les variations de l'élévation sont environ 1 000 fois plus petites que le diamètre de la cornée mesurée.*

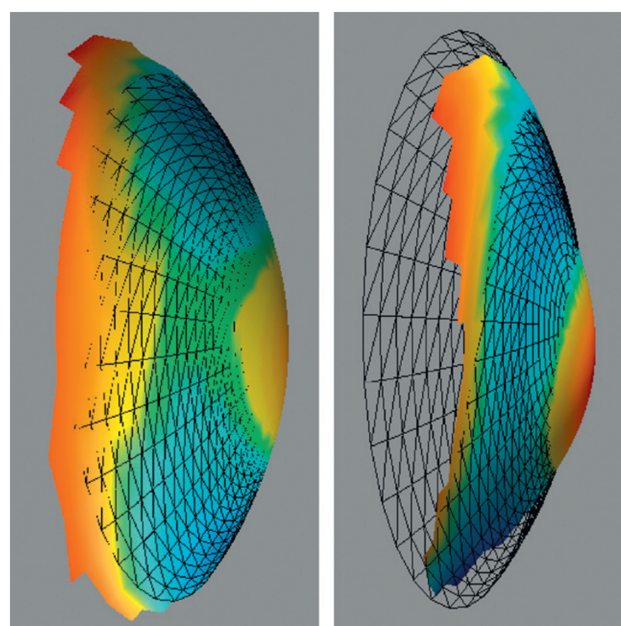


**Fig. 6.9. Représentation à l'échelle de l'élévation d'une surface antérieure de cornée normale (à gauche) et d'une cornée atteinte de kératocône (à droite).**
*La sphère de référence calculée est représentée par un maillage sombre. La cornée atteinte de kératocône présente une surface dont les points sont situés « plus loin » de la sphère de référence calculée, en particulier vers le sommet.*

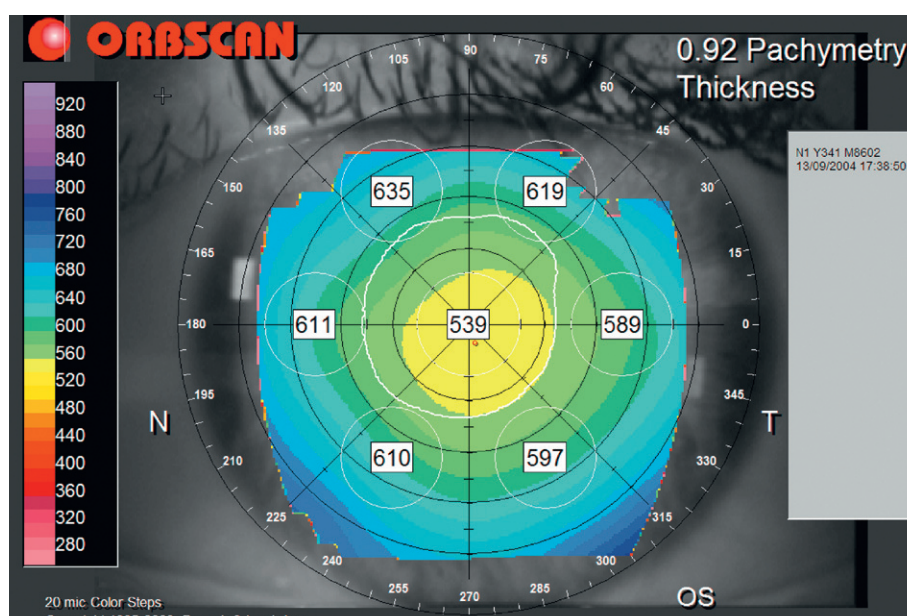



**Fig. 6.10. Exemple de carte pachymétrique.**
*L'échelle correspond à la distribution de l'épaisseur en microns. L'emplacement du point le plus fin (*thinnest point*) est matérialisé par le point rouge. Les chiffres présentés sur la carte correspondent à des épaisseurs moyennes locales.*

Certains topographes proposent un mode de visualisation tridimensionnel ; il permet de bien visualiser les rapports entre la surface analysée et la sphère de référence calculée. Il faut toujours garder à l'esprit que les cornées normales ne « dévient » que d'une à deux dizaines de microns environ de cette sphère calculée dans la région centrale (Fig. 6.8). Au-delà, il faut rechercher l'existence d'une pathologie cornéenne (ex. kératocône) (Fig. 6.9).

Disposer de l'élévation antérieure et postérieure, tout en connaissant l'écart entre ces surfaces, permet de réaliser une carte de pachymétrie, qui fournit un relevé particulièrement exhaustif des variations de l'épaisseur cornéenne. L'échelle de couleur varie des couleurs chaudes (cornées fines) aux couleurs plus froides (cornées épaisses) (Fig. 6.10). La valeur de l'épaisseur minimale, sa localisation, l'existence d'un

amincissement central ou paracentral sont autant d'informations recherchées en chirurgie réfractive, dans le cadre du dépistage du kératocône infraclinique par exemple.

Tout comme la variation du niveau de la mer influencerait la hauteur relative des structures présentes à la surface de la terre, la variation du rayon et de l'alignement de la sphère influence la carte topographique. Rappelons que par défaut, il n'y a pas de contraintes d'alignement (sphère « flottante », ou mode *float*). Le centre de la BFS n'est pas contraint de se situer sur l'axe géométrique de la cornée, et la sphère choisie correspond simplement à celle qui épouse le mieux la surface cornéenne considérée [3].

### Application clinique

Cette « congruence anatomique » entre la surface analysée et la sphère de référence explique qu'il puisse être utile pour le contactologue de représenter la surface cornéenne en élévation, voire d'utiliser le rayon de cette sphère pour approcher celui d'une lentille de contact d'essai. Certains topographes sont munis d'une fonction logicielle permettant de faciliter l'adaptation de lentilles rigides.

## Représentations alternatives en élévation

Des contraintes d'alignement peuvent être ajoutées à la sphère de référence calculée, et d'autres surfaces géométriques de références peuvent être choisies, telles que des ellipsoïdes, des toroïdes ou tout conicoïde [4].

### Contraintes d'alignement

Les différents choix possibles pour l'alignement sont les suivants : *float*, *axis*, *pinned* ou *apex* (Fig. 6.11) :

- le mode *float*, dans lequel aucune contrainte n'est appliquée à la sphère de référence, est le mode par défaut de la plupart des topographes ;
- l'alignement *axis* contraint le centre géométrique de la sphère à être aligné avec celui de la cornée, avec possibilité de se déplacer le long de celui-ci ;
- la contrainte *pinned* impose une intersection de la sphère de référence et de la surface sur l'axe de visée ;
- le mode *apex* combine les deux contraintes, celle du mode *pinned* et celle du mode *axis*.

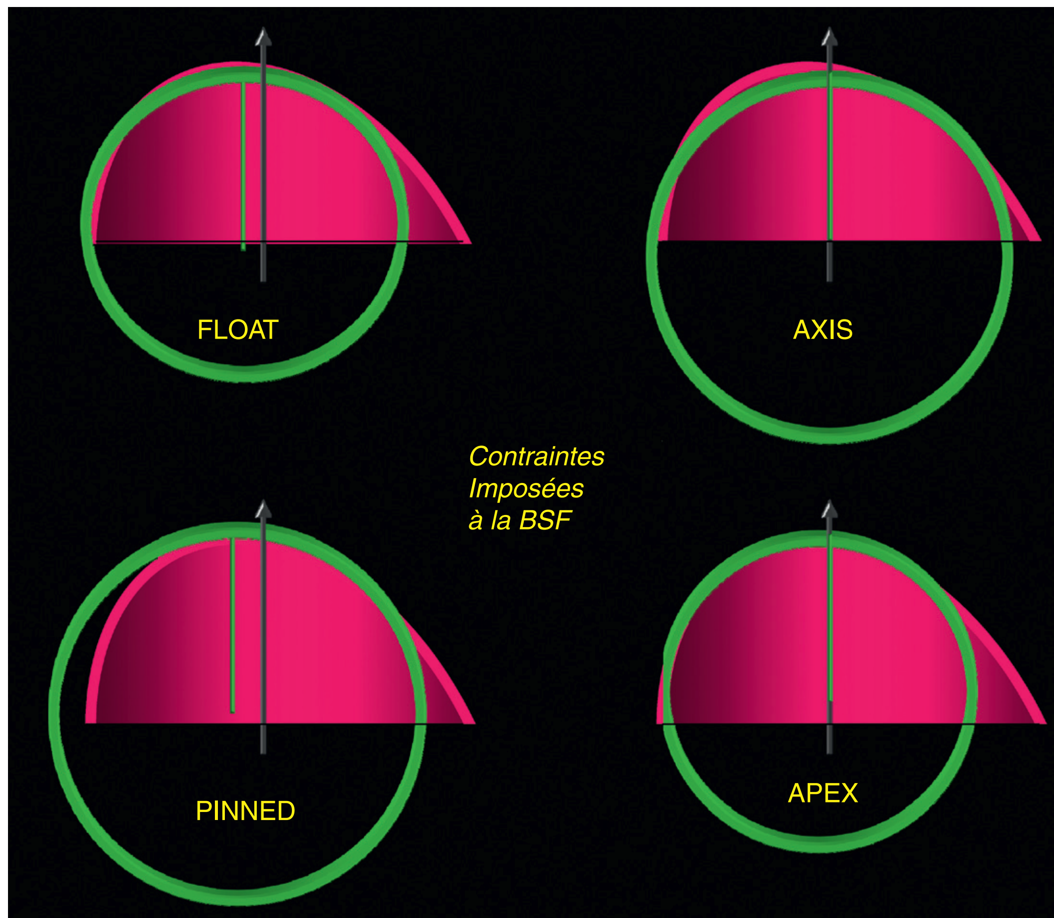



***Fig. 6.11.*** ***Représentation schématique des différentes contraintes d'alignement possibles pour le calcul d'une sphère de référence.*** *La flèche verticale marque l'emplacement du centre géométrique de la cornée.*

## Application clinique

Ces différents modes ont le mérite de souligner la « relativité » de la représentation de l'élévation des surfaces cornéennes. L'utilisation des modes *axis* ou *pinned* révèle particulièrement la présence d'une composante asymétrique de l'élévation. Elle est par conséquent intéressante dans l'analyse d'un décentrement après Lasik ; l'alignement de la sphère de référence avec le centre géométrique de la cornée rehausse les variations asymétriques de l'élévation (Fig. 6.12 et 6.13).

## Surfaces de références non sphériques

Il est possible de sélectionner dans le menu du logiciel de topographe comme l'Orbscan, le Pentacam ou le Galilei une surface de référence *non* sphérique. Par défaut, le calcul des surfaces de référence est effectué en mode *float*. Il est également possible de contraindre l'axe géométrique de ces surfaces à s'aligner sur celui de la cornée (ex : mode axial avec l'Orbscan). L'intérêt des surfaces non sphériques est de mieux « coller » à la réalité géométrique de la cornée, et de permettre de scinder qualitativement l'effet de certaines caractéristiques de la forme de la surface analysée (Fig. 6.14).

### Sphérocylindre

La surface de référence utilisée est une surface torique correspondant à la réunion d'une sphère et d'une surface en forme de « selle ». Elle ressemble à une section de tore, dont les rayons de courbures apicaux principaux sont calculés afin d'épouser au mieux la surface analysée (Fig. 6.15), et dont chacune des sections est circulaire.

Comme nous l'avons souligné, l'utilisation de cette surface de référence torique permet de révéler les variations topographiques induites par l'asphéricité en cas de surface fortement torique. En effet, la toricité de la surface de référence « épouse » celle de la cornée, et ce faisant « neutralise » une partie de l'écart d'élévation lié à la toricité. Une carte topographique résultante évocatrice d'une asphéricité prolate accentuée est un argument qui plaide en la faveur d'un kératocône en cas de doute diagnostique.

### Ellipse

Dans le mode *ellipsoid*, la surface de référence est un ellipsoïde, qui est une surface engendrée par l'élongation d'une sphère le long d'un de ses axes. Elle peut être torique (élongation de deux axes au minimum) et dans ce cas chacune des sections méridionales possède un pourtour elliptique dont l'asphéricité est fixée et proche de l'excentricité moyenne de la surface cornéenne. L'utilisation de cette surface permet de « neutraliser » au moins partiellement l'asphéricité et la toricité cornéenne centrale. La représentation en mode « ellipse » révèle donc les écarts entre la surface cornéenne analysée et une cornée « moyenne ». Elle peut permettre de révéler une apshéricité et/ou une irrégularité supérieure à la moyenne (Fig. 6.16).

### Aconique

La surface de référence utilisée correspond à la somme d'un conoïde et d'une surface torique et symétrique en forme de « selle ». Elle est donc asphérique et torique, et

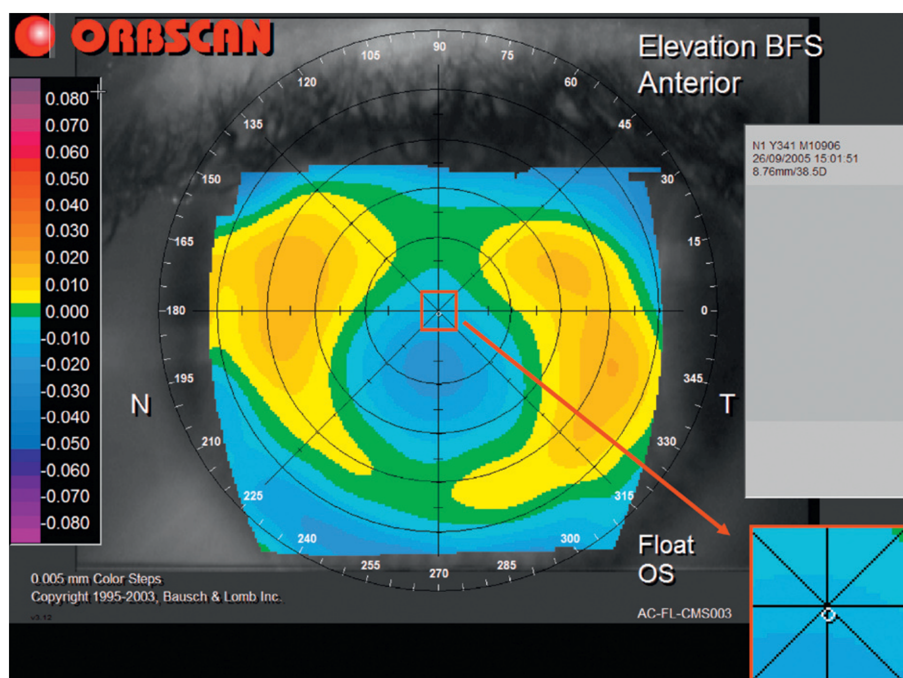



**Fig. 6.12.** ***Représentation en élévation vis-à-vis d'une sphère de référence en mode flottant (float) d'une surface cornéenne antérieure chez un patient opéré de Lasik myopique (œil gauche).***
*Un décentrement inférieur de la photoablation est suspecté. Le centre de la sphère de référence calculée est légèrement décalé sous le centre géométrique de la cornée (voire agrandi en bas à gauche où la projection du centre de la sphère est matérialisée par un cercle blanc).*

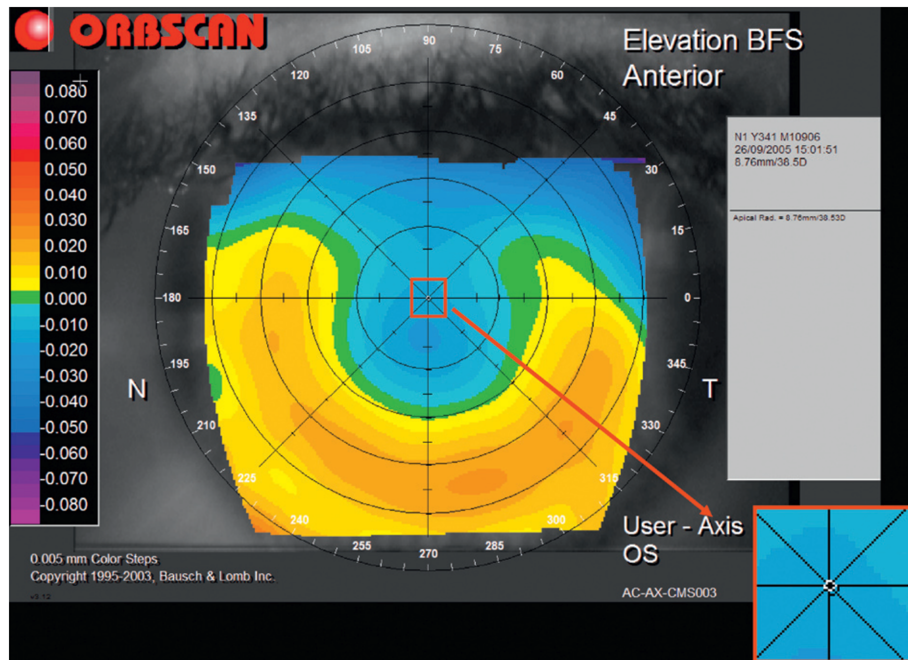



***Fig. 6.13. La même surface est représentée en mode* axis *(l'utilisateur a contraint la sphère de référence à garder le même rayon qu'en mode flottant).***
*Le centre de la sphère est situé sur l'axe géométrique de la cornée. La distribution de l'élévation est nettement plus asymétrique. Le mofif s'explique par le fait qu'en raison du décentrement inférieur, les hémiméridiens inférieurs sont en moyenne plus plats que les hémiméridiens supérieurs. De fait, la sphère de référence doit adopter un rayon intermédiaire. Les hémiméridiens les plus plats apparaissent alors localisés au-dessus de la sphère.*

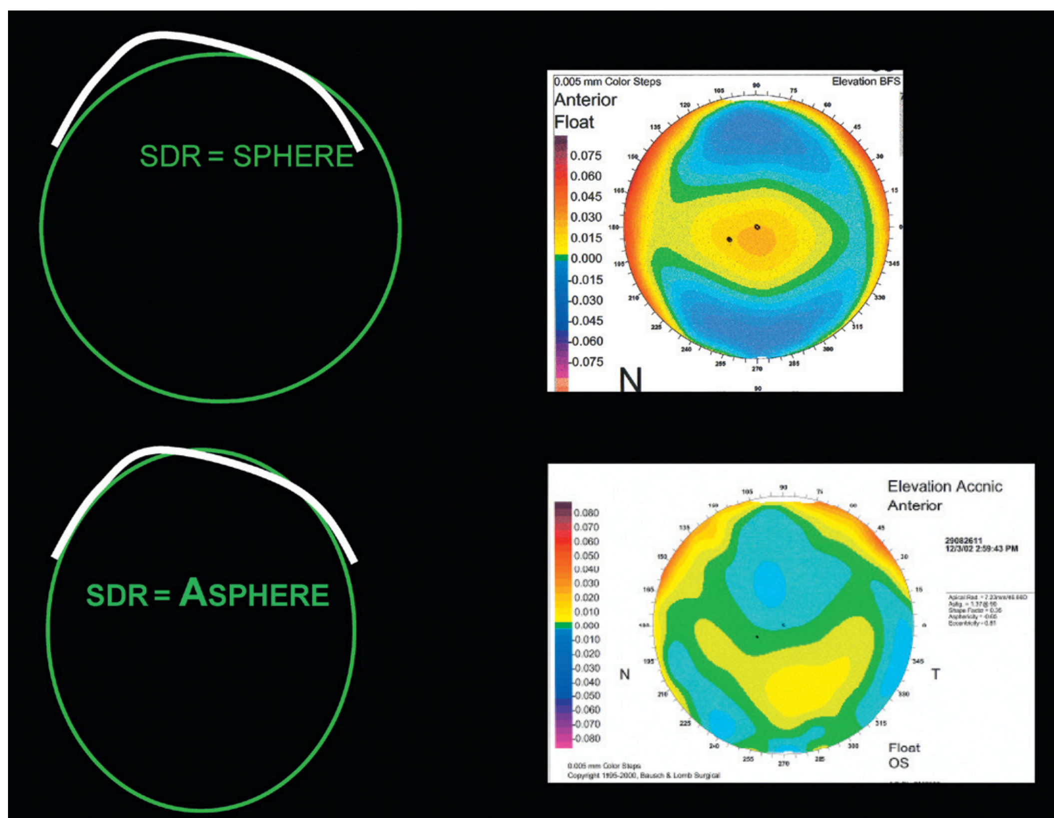



***Fig. 6.14. Principe de l'effet du changement de surface de référence.***
*La cornée étant naturellement légèrement asphérique et asymétrique (en plus de présenter un degré variable de toricité), le choix d'un type de surface de référence exempt (sphère) ou muni d'une ou plusieurs de ces caractéristiques permet souvent de mieux épouser le relief cornéen. De plus, le degré d'asphéricité et de toricité de la surface de référence fournit une « estimation » de celui de la surface cornéenne analysée. À gauche, représentation schématique d'un profil cornéen (en blanc) et sa surface de référence (profil vert). À droite, un exemple de carte d'élévation ou un changement de surface de référence (sphère en haut, et surface aconique en bas) a été effectué. Le mode* aconic *permet à la surface de référence calculée d'être torique et apshérique. Cette représentation permet de souligner un certain degré d'asymétrie verticale dans le relief étudié. Cette carte correspond à une cornée atteinte de kératocône débutant.*

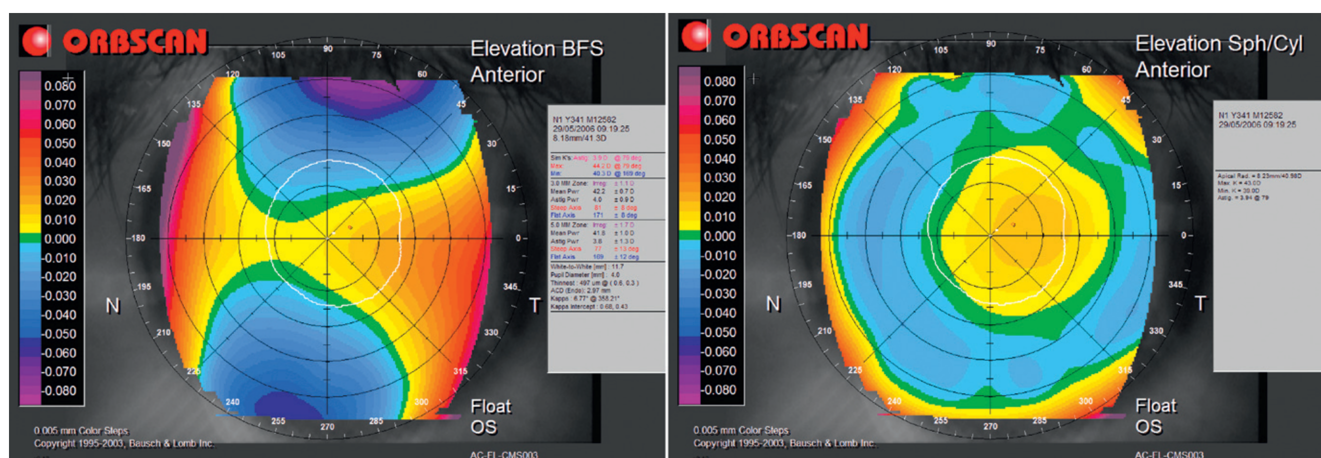



***Fig. 6.15. Représentation d'une même surface cornéenne selon deux surfaces de références différentes.***
*À gauche, la carte d'élévation est effectuée selon une sphère de référence flottante (rayon de 8,18 D, converti à 41,3 D en utilisant un indice kératométrique). Elle révèle une morphologie où la toricité « domine » le rendu d'élévation colorimétrique. À droite, la même surface est représentée vis-à-vis d'une surface torique « sphérocylindrique ». Il s'agit d'une surface dont les méridiens ont une courbure qui varie entre deux extrêmes (ici 39 et 43 D pour une moyenne égale à 40,98 D). Il existe une différence de 3,94 D en faveur du méridien situé à 79° (ces valeurs sont mentionnées dans la fenêtre grisée, et ont été calculées par le logiciel du topographe Orbscan). Le motif est celui d'une distribution dominée par l'asphéricité de type prolate. Les variations de l'élévation (les « écarts ») sont plus restreintes car la surface cornéenne analysée est mieux « épousée » par la surface sphérocylindrique de référence. L'utilisation du mode d'élévation vis-à-vis d'une surface torique a permis de « gommer » l'effet de la toricité sur l'élévation. Elle fait ressortir le caractère légèrement prolate de l'asphéricité, et confirme l'absence d'asymétrie majeure. Cette cornée peut être comprise comme une cornée normale (image de droite), à laquelle on ajoute un degré important de toricité régulière. Cette représentation réduit la probabilité de présence d'un kératocône pour cette cornée.*

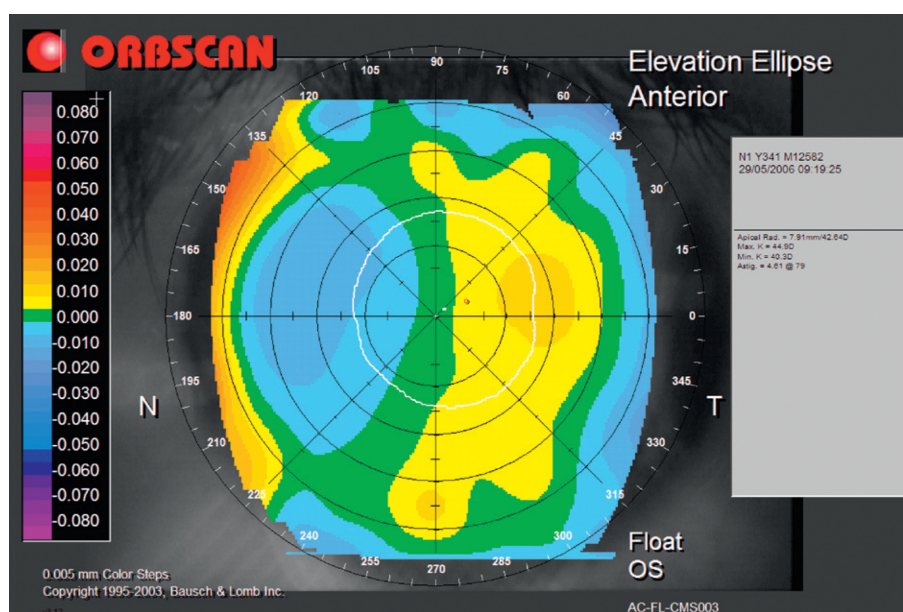



***Fig. 6.16. Représentation en mode « ellipse » de la même surface cornéenne antérieure que celle utilisée pour la Fig. 6.15.***
*Ce mode permet de dégager l'effet de l'asymétrie, en neutralisant la toricité régulière, et la composante asphérique « moyenne ». L'asymétrie résiduelle correspond à l'asymétrie physiologique entre le versant nasal et temporal de la cornée.*

les valeurs de rayon de courbure apical et d'asphéricité sont libres et calculées pour épouser au mieux la surface analysée. L'utilisation d'une telle surface permet d'« extraire » l'asphéricité et la toricité régulière de la représentation de la surface analysée, afin de mieux en révéler les irrégularités éventuelles (Fig. 6.17). La réduction des disparités d'élévation en mode « aconique » indique généralement une certaine régularité de la surface étudiée (Fig. 6.18), alors que l'inverse confirme la présence d'un taux significatif d'irrégularité (Fig. 6.19).

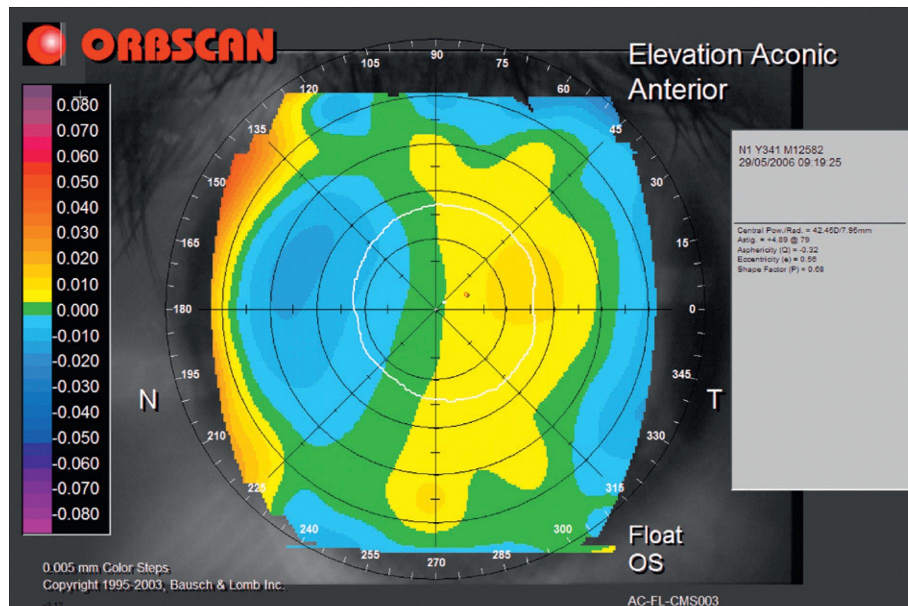
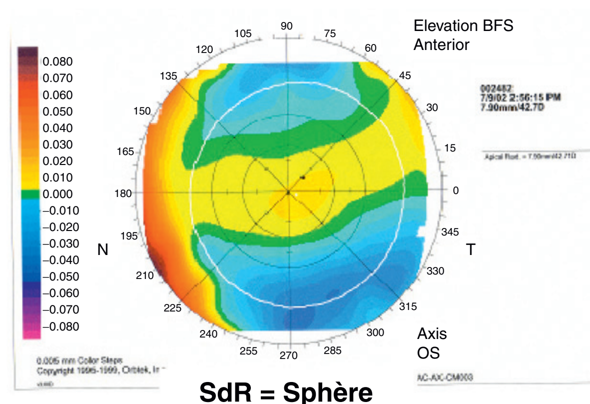
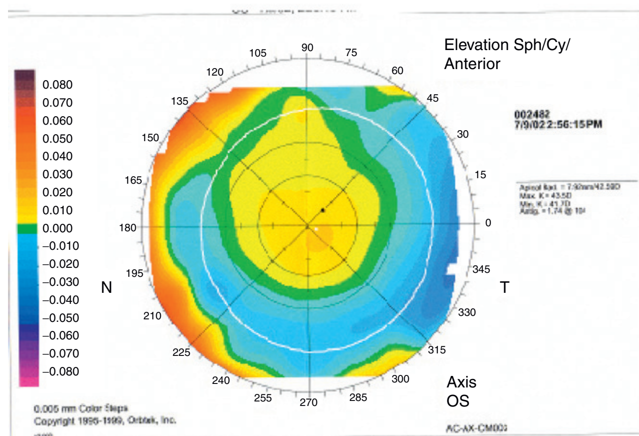



***Fig. 6.17.* Représentation en mode** aconic **de la même surface cornéenne antérieure que celle utilisée pour la Fig. 6.15.**
*Ce mode permet de dégager l'effet de l'asymétrie, en neutralisant une part importante de l'asphéricité et de la toricité régulière. Ici, on note que l'irrégularité se répartit essentiellement autour d'un axe vertical, et correspond à l'asymétrie physiologique entre le versant nasal et temporal de la cornée. Les cartes obtenues en mode* aconic *et « ellipse » sont très proches. Ceci souligne indirectement la présence d'une composante asphérique « moyenne ».*




SdR = Sphéro cylindre

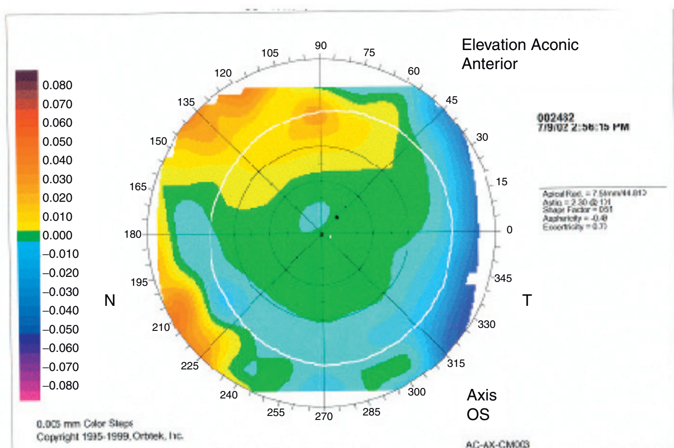



***Fig. 6.18.* Le mode sphérocylindrique « neutralise » l'effet de la toricité sur le rendu d'élévation, qui est maintenant dominé par un pattern évocateur d'asphéricité prolate.**
*Le choix du mode* aconic *(surface de référence à la fois torique et asphérique) permet d'approcher encore plus le profil de la surface cornéenne analysée : celui-ci est quasiment confondu avec cette surface de référence dans les 3 mm centraux (flèche). L'élévation résiduelle correspond à l'irrégularité physiologique.*

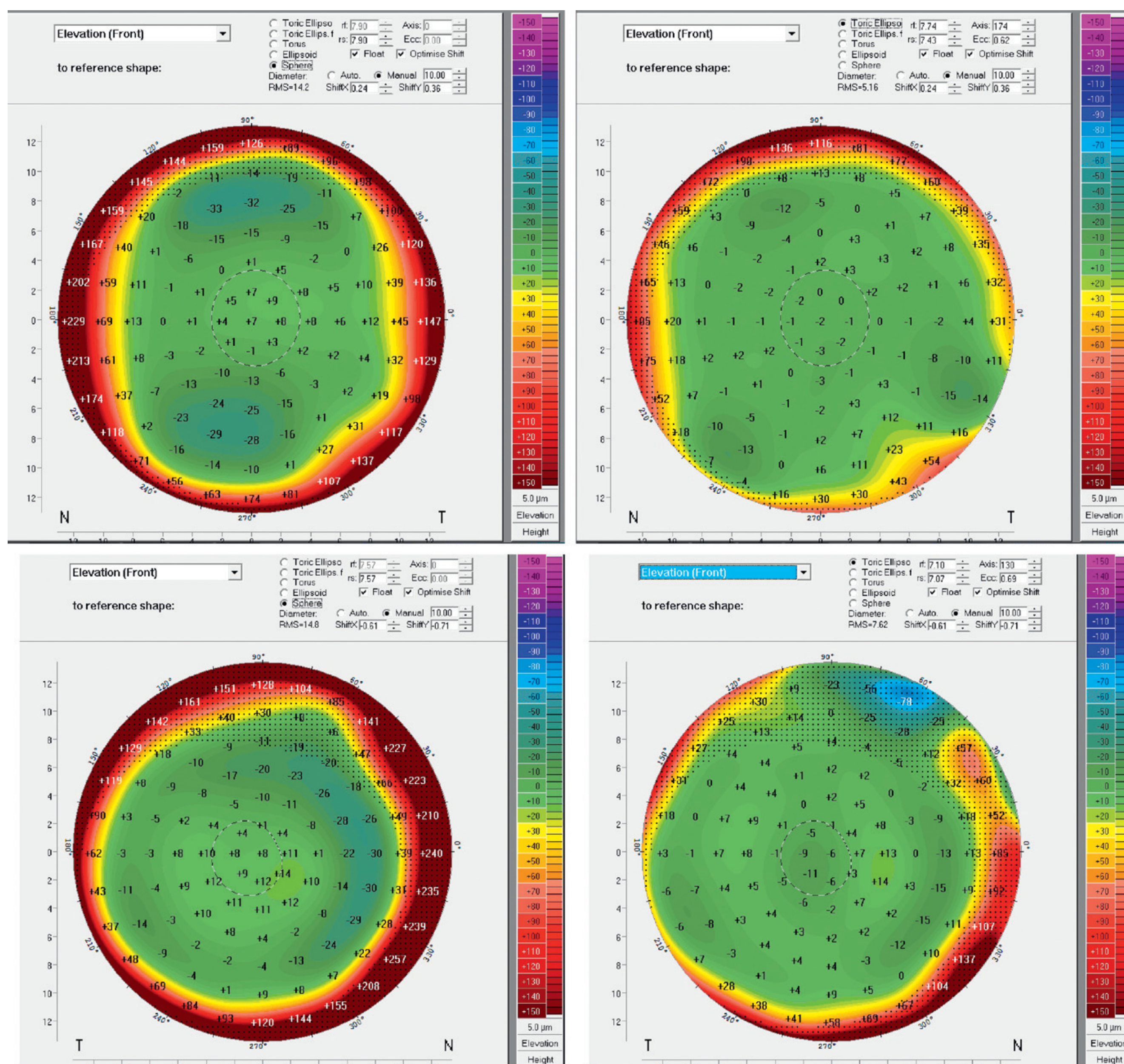



***Fig. 6.19. Comparaison entre une représentation en élévation vis-à-vis d'une sphère de référence (à gauche) et d'un ellipsoïde torique (à droite), dans le cadre d'une cornée normale (en haut) et d'une suspicion de kératocône (en bas).***
*Même si les disparités d'élévation sont réduites avec la surface de référence torique et ellipsoïdale, elles persistent à un degré prononcé pour la cornée présentant une suspicion de kératocône, en particulier dans la région paracentrale.*

## Applications cliniques

– La topographie d'élévation apporte des données irremplaçables sur la morphologie des surfaces cornéennes. Les données d'élévation permettent de mesurer plus directement le remodelage cornéen induit par les profils d'ablation et seront utiles dans l'élaboration et l'amélioration des profils d'ablation personnalisés.

– La comparaison entre les données issues de l'aberrométrie et de la topographie cornéenne d'élévation pourra être utile pour comprendre la genèse et l'origine de certaines aberrations optiques de l'œil humain.

– L'utilisation de contraintes d'alignement et de surfaces de référence non sphériques (en particulier sphérocylindriques et aconiques) apporte pourtant une contribution intéressante à la compréhension de l'anatomie cornéenne topographique et pourra certainement représenter une aide précieuse au diagnostic de certaines affections cornéennes inductrices d'irrégularité.

– Les caractéristiques de la sphère de référence (rayon, zone de diamètre analysée) peuvent être utiles à l'adaptation de lentille de contact. À l'inverse, les effets induits par le port prolongé des lentilles de contact peuvent être révélés par la topographie d'élévation.

– Le degré de toricité et d'asphéricité des surfaces de référence non sphérique est un bon indicateur du degré de toricité et d'asphéricité de la surface cornéenne analysée. L'emploi du mode aconique peut être utile pour quantifier ces caractéristiques à la fois pour la face antérieure et postérieure d'une cornée.

– Les cartes révélant les irrégularités de la surface cornéenne soulignées par les surfaces de référence non sphériques peuvent être comparées aux cartes d'aberrations optiques de haut degré ; il existe en général une bonne correspondance entre ces données (les aberrations optiques de haut degré proviennent principalement de la surface cornéenne antérieure). Il est alors judicieux de combiner le choix de ce type de surface avec celui d'un diamètre d'analyse particulier, en général proche de celui de la pupille sur laquelle est recueilli le front d'onde [5]. En effet, l'utilisation d'une surface de référence torique et asphérique en mode *float* pour la représentation de la surface cornéenne en élévation est un processus de régression analogue à l'extraction de certaines aberrations optiques de bas degré (*tilt*, défocus, astigmatisme) du front d'onde total. Le motif d'élévation obtenu est souvent proche sur le plan qualitatif de la distribution des déphasages du front d'onde oculaire (en l'absence de contribution significative des dioptres internes).

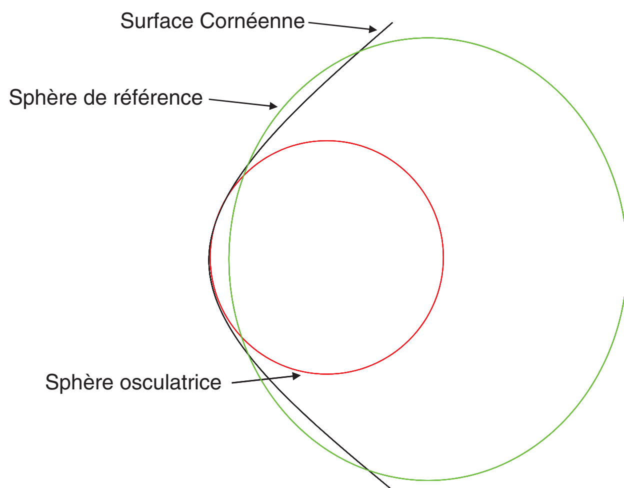



***Fig. 6.20.*** ***Représentation schématique en profil de la sphère de référence et de la sphère osculatrice pour une surface cornéenne.***

## Sphère de référence, sphère osculatrice, quelle différence ?

Malgré leur « proximité » la sphère de référence et la sphère osculatrice d'une même surface cornéenne ne doivent pas être confondues (*N.-B. :* il est fait plus référence au cercle osculateur dans ce livre qui est l'équivalent bidimensionnel de la sphère de référence, quand on raisonne sur un méridien donné) (Fig. 6.20). La sphère de référence a un positionnement « libre », et doit épouser au mieux l'ensemble des points de la surface cornéenne. Elle n'est pas contrainte à être tangente au sommet de la cornée, contrairement à la sphère osculatrice. La valeur de la kératométrie moyenne exprimée en mm fournit une bonne approximation du rayon de la sphère osculatrice. En pratique, le rayon de la sphère osculatrice est généralement plus petit que celui de la sphère de référence, du moins pour les cornées prolates ; l'influence des points situés à la périphérie cornéenne (plus plate, et donc avec un plus grand rayon de courbure local) tend à accroître le rayon de la sphère de référence, et en éloigner la surface de l'apex cornéen. [6]

### Références

[1] Demirbas NH, Pflugfelder SC. Topographic pattern and apex location of keratoconus on elevation topography maps. Cornea 1998 ; 17 (5) : 476–84.
[2] Applegate RA, Nuñez R, Buettner J, Howland HC. How accurately can videokeratographic systems measure surface elevation ? Optom Vis Sci 1995 ; 72 (11) : 785–92.
[3] Gatinel D. Principes, intérêt et sémiologie de la topographie d'élévation en Lasik. In : Gatinel D, Hoang-Xuan T, editors. Le Lasik, de la théorie à la pratique. Paris : Elsevier ; 2003. p. 189–99.
[4] Burek H, Douthwaite WA. Mathematical models of the general corneal surface. Ophthalmic Physiol Opt 1993 ; 13 : 68–72.
[5] Gatinel D. Corneal Topography and Wavefront analysis. In : Albert DM, Jakobiec FA, editors. Principles and Practice of Ophthalmology. 4th ed. USA : Saunders, Elsevier ; 2007.
[6] Gatinel D, Malet J, Hoang-Xuan T, Azar DT. Corneal elevation topography: Best Fit Sphere, elevation distance, asphericity, toricity, and clinical implications. Cornea. 2010 Dec 15. [Epub ahead or print].

Chapitre 7

# Traduction des propriétés géométriques de la surface cornéenne sur les cartes de courbure et d'élévation

La cornée est un tissu biologique vivant dont la géométrie se rapproche mais ne peut se confondre parfaitement avec celle des formes géométriques idéales.

La surface antérieure de la cornée est une surface asphérique convexe : en dehors de la région tout à fait centrale, sa forme s'écarte de celle d'une sphère [1]. Elle est habituellement plus cambrée au centre et plus plate en périphérie, cette forme étant qualifiée de « prolate ». Cette asphéricité est inversée par la chirurgie réfractive démyopisante. Elle présente aussi souvent des degrés variables de toricité, celle-ci étant définie par la variation de la courbure des différents méridiens cornéens. La surface cornéenne peut ainsi être décrite comme asphéro-torique. Elle est habituellement légèrement asymétrique, la portion nasale étant plus plate que la portion temporale. Elle est parfois irrégulière, notamment au cours de circonstances pathologiques.

La toricité cornéenne régulière se traduit par une variation douce de la courbure moyenne entre les méridiens les plus cambrés et les méridiens les plus plats. L'asymétrie peut être décrite comme une différence de courbure entre hémiméridiens opposés.

L'apparition ou l'accentuation de certaines caractéristiques comme l'asymétrie ou l'asphéricité prolate pour une cornée également porteuse d'une toricité importante fera évoquer en premier lieu le diagnostic de kératocône.

L'irrégularité est une forme d'asymétrie non systématisée et qui se rencontre au cours de circonstances cliniques plus particulières (traumatisme, kératites, etc.).

Les conséquences topographiques de ces caractéristiques s'expriment différemment au niveau des cartes de courbure et d'élévation. La représentation de la face postérieure de la cornée n'est possible qu'en élévation ; les modifications à ce niveau sont comparables à celles observées au niveau de la surface antérieure.

L'asphéricité, la toricité et l'asymétrie sont trois caractéristiques majeures qui permettent de caractériser les principaux aspects rencontrés lors de l'analyse d'une carte topographique. Ils constituent trois piliers sémiologiques caractérisés par des motifs colorimétriques caractéristiques qui apparaissent sur les cartes de courbure ou d'élévation, permettant une orientation diagnostique rapide. En plus de la face antérieure, les données d'élévation recueillies pour la face postérieure de la cornée se prêtent également à cette analyse.

L'annexe proposée en fin de chapitre fournit une description plus mathématique de ces caractéristiques au lecteur intéressé.

## Asphéricité

L'asphéricité est la variation de courbure de l'apex vers la périphérie cornéenne.

### Dans les cartes de courbure

L'asphéricité négative physiologique (aplatissement périphérique progressif, profil prolate) de la surface cornéenne entraîne une diminution de la courbure du centre vers la périphérie (Fig. 7.1). Dans les cartes de courbure, cela devrait se traduire par des zones concentriques de couleurs progressivement plus froides, du centre vers la périphérie (Fig. 7.2). Ces variations sont mieux soulignées dans le mode tangentiel (instantané) qu'axial (sagittal) (Fig. 7.3). Une représentation en courbe des variations de la courbure (exprimée en dioptries) montre la réduction de la courbure du centre vers les bords (Fig. 7.4). Il est à noter que cette réduction en dioptries de courbure ne présage pas d'une réduction de la puissance optique. En effet, la réduction de courbure est souvent insuffisante pour contrer l'apparition d'une aberration sphérique cornéenne positive, comme en témoigne l'augmentation périphérique des chiffres de puissance optique sur les cartes de puissance « réfractive » (Fig. 7.5).

En cas d'asphéricité oblate, les couleurs des zones concentriques deviennent plus chaudes vers la périphérie. Ce type d'asphéricité s'observe essentiellement après

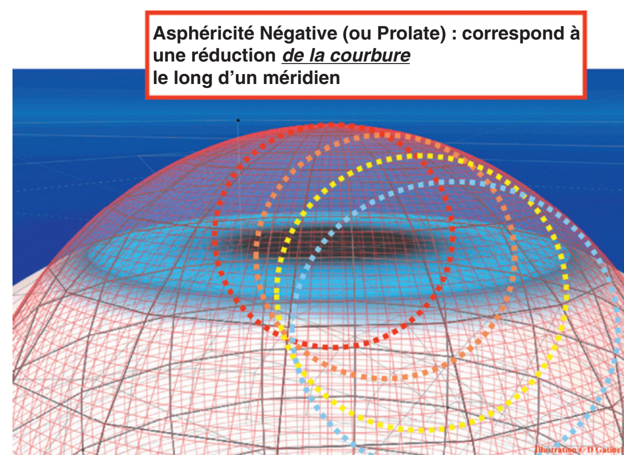



**Fig. 7.1.** ***L'asphéricité négative (Q < 0) ou prolate correspond à une réduction de la courbure du centre vers les bords.*** *Elle est ici figurée schématiquement le long d'un hémiméridien cornéen (plan méridional, ou tangentiel). La courbure correspond au rayon du cercle « tangent » (osculateur) au point considéré (le rayon apparent de cercle est volontairement réduit ici pour des raisons de lisibilité).*

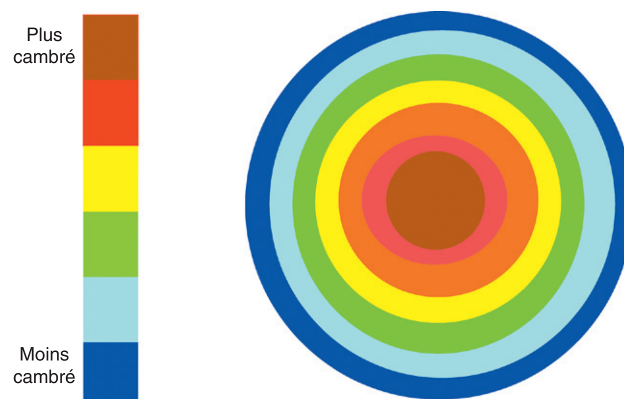



**Fig. 7.2.** ***Représentation schématique de la répartition colorimétrique des cartes de courbure pour une cornée prolate.***

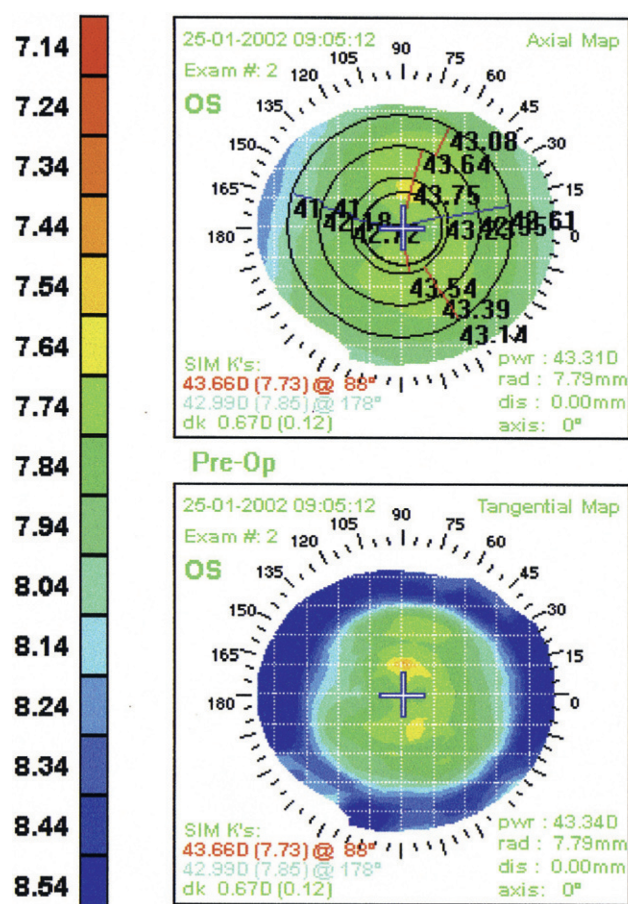



**Fig. 7.3. Exemple de cartes topographiques de courbure dominées par une asphéricité prolate.**
*Elle est plus évidente en mode tangentiel (en bas) qu'en mode axial (en haut). Il existe également une légère toricité (« astigmatisme cornéen direct »). Noter l'échelle en mm : les rayons de courbure augmentent vers la périphérie (courbure plus plate).*

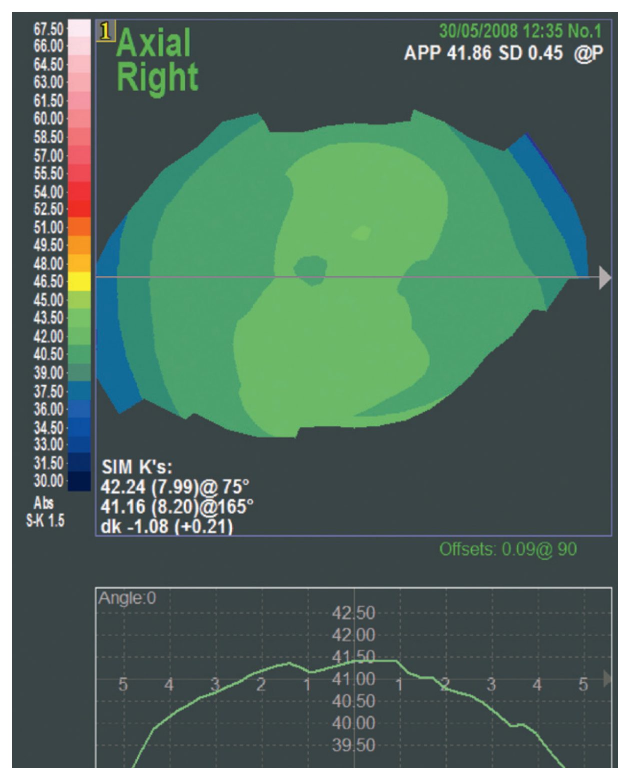



**Fig. 7.4. Courbe représentant la courbure dioptrique (en bas) le long du méridien horizontal, à travers une carte de courbure axiale (en haut).**
*Noter la décroissance globale de la courbure du centre vers les bords. Les chiffres de courbure exprimés en dioptries sont obtenus à partir des valeurs millimétriques des rayons de courbure, et la formule de vergence avec un indice « kératométrique » (n = 1,3375). L'asphéricité moyenne dans la zone des 6 mm centraux a été estimée à Q = –0,41 par le logiciel d'analyse du topographe.*

chirurgie cornéenne pour corriger la myopie (Fig. 7.6), et après greffe de cornée. La présence d'une cambrure plus marquée en périphérie résulte en une accentuation encore plus rapide de la puissance optique cornéenne (Fig. 7.7).

## Dans les cartes d'élévation

La forme d'une cornée prolate s'apparente à celle de l'extrémité pointue (extrémité prolate) d'un ellipsoïde [2]. Tracées par rapport à sa meilleure sphère de référence, ses parties centrale et périphérique extrême apparaissent comme des parties « émergées » (couleurs chaudes) tandis que sa moyenne périphérie est représentée comme une partie « immergée » (couleurs froides) (Fig. 7.8). La « réémergence » d'une fine collerette périphérique est attendue (en cas de faible toricité associée). Une configuration opposée est obtenue en cas d'asphéricité positive (oblate). La partie centrale apparaît alors immergée sous la meilleure sphère de référence, la moyenne périphérie faisant au contraire saillie au-dessus.

Plus l'asphéricité prolate est prononcée, plus l'écart par rapport à la sphère est grand et plus la valeur de l'élévation de l'apex par rapport à la BFS est importante, ce qui se traduit par des couleurs de plus en plus chaudes au centre (Fig. 7.9). Pour une même asphéricité, cette distance entre l'apex et la BFS est d'autant plus prononcée que la courbure apicale est importante (faible rayon de courbure apical) (Fig. 7.10) [3]. La face postérieure de la cornée étant physiologiquement plus cambrée et prolate que la face antérieure, les valeurs d'élévation centrales sont plus prononcées ; ceci est corroboré par l'existence de couleurs plus chaudes à ce niveau. L'augmentation de l'asphéricité prolate de la face postérieure est un signe précoce de kératocône infraclinique ; c'est aspect n'est pas spécifique, mais possède une forte valeur de présomption diagnostique s'il s'associe à d'autres signes topographiques (asymétrie antérieure, réduction de l'épaisseur centrale, etc.).

L'asphéricité oblate conduit logiquement à un aspect inverse. La zone centrale est recouverte par le sommet de la sphère de référence calculée (élévation négative), est entourée d'une collerette « émergée » en moyenne périphérie, elle-même cernée d'une fine collerette en élévation négative (Fig. 7.11). La présence d'un aspect conjoint d'asphéricité oblate aux niveaux des faces antérieure et postérieure est observée après chirurgie incisionnelle (Fig. 7.12) et kératoplastie transfixiante (Fig. 7.13). Contrairement au Lasik ou à la PKR, dont le site d'action exclusif concerne le stroma antérieur, ces

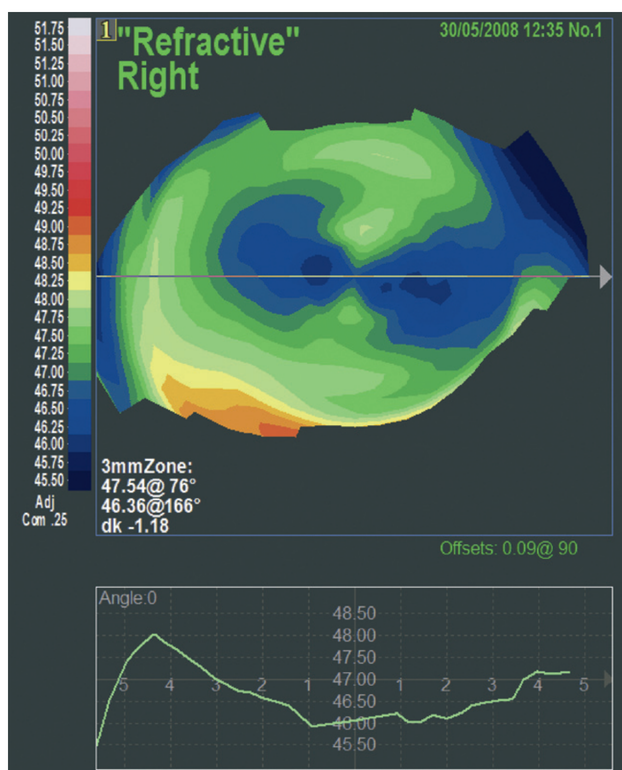



**Fig. 7.5. Carte de puissance réfractive correspondant à la même surface cornéenne que celle représentée en mode axial (Fig. 7.4).** *Malgré une réduction de la courbure, il existe une augmentation de la puissance optique (vergence) du centre vers les bords. Les chiffres de puissance optique sont obtenus par un calcul faisant appel aux lois de l'optique géométrique (ray-tracing). L'indice de réfraction utilisé est n = 1,376 (indice de réfraction « physique »).*

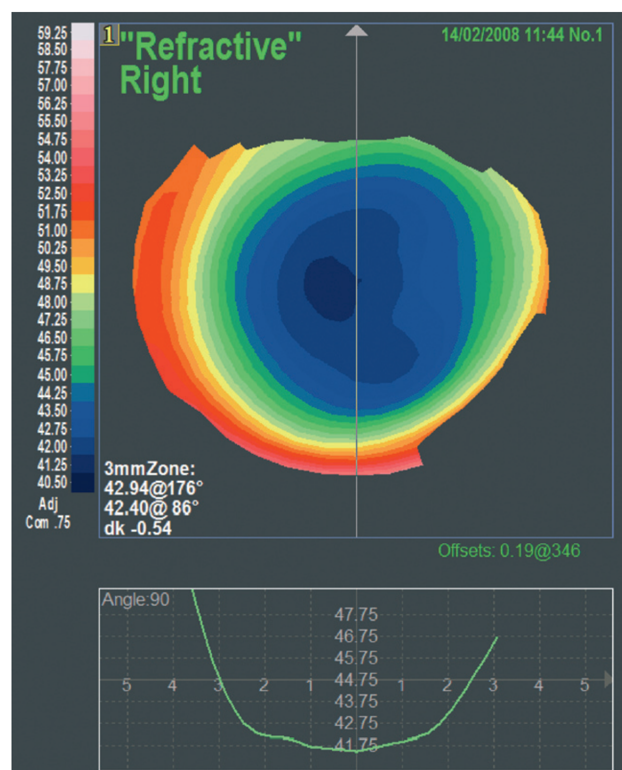



**Fig. 7.7. Carte de puissance réfractive correspondant à la même surface cornéenne ; noter l'accentuation des variations périphériques au niveau la courbe de puissance optique (ici : méridien vertical).** *Au centre, les variations de puissance cornéenne sont également plus marquées que pour la courbure.*

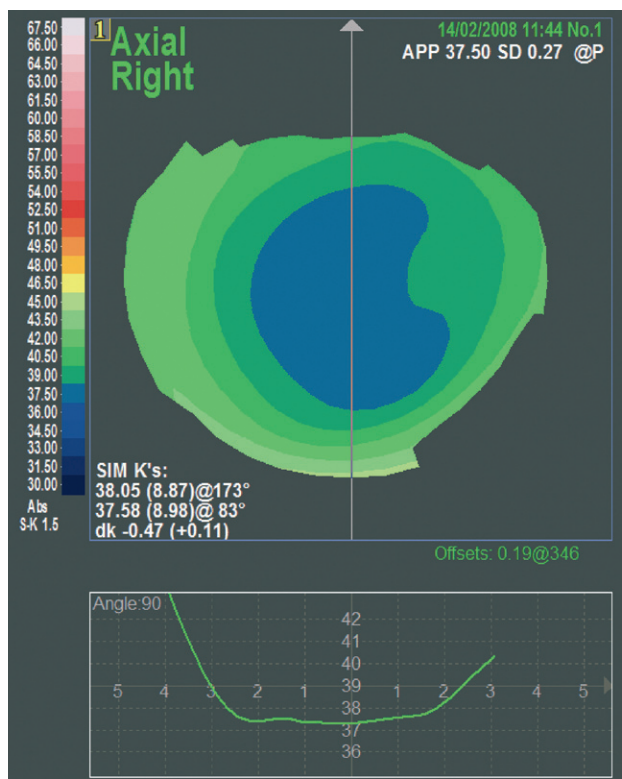



**Fig. 7.6. Représentation en carte de courbure axiale d'un patient opéré de Lasik pour –6 D.** *Le profil de courbure (en bas, pour le méridien vertical) montre une zone de courbure relativement constante, alors qu'en périphérie (zone de raccord), la courbure augmente.*

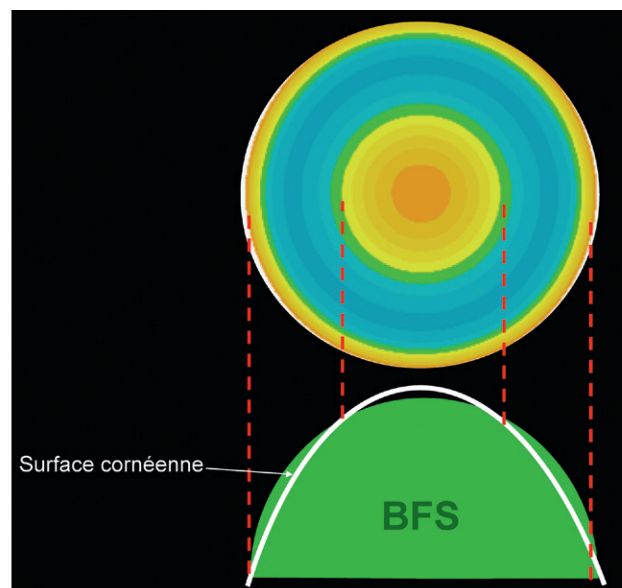



**Fig. 7.8. Représentation en élévation vis-à-vis d'une sphère de référence d'une surface prolate.** *La partie centrale apparaît émergée, contrairement à une couronne périphérique dont les points sont situés « sous » la BFS. En périphérie, il existe une collerette d'élévation positive.*

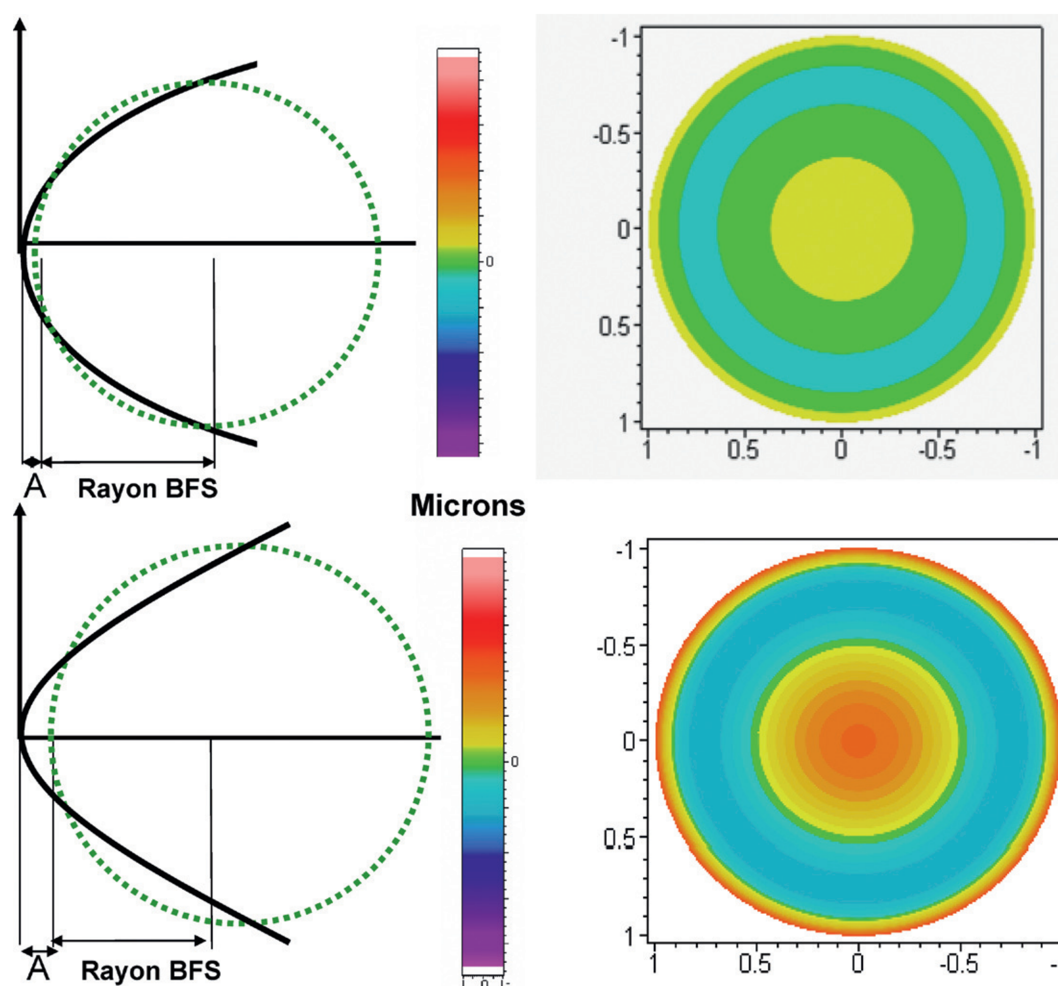



**Fig. 7.9.** *Détermination de la répartition de l'élévation pour deux surfaces de courbure apicale et d'asphéricité différentes.*
*Pour chaque surface, une sphère de référence doit être calculée en mode float par un algorithme mathématique. Le positionnement de la sphère vis-à-vis de la surface est représenté schématiquement en coupe à gauche. L'échelle utilisée est identique, et pour un diamètre analysé de 10 mm, chaque pas de l'échelle correspond à 5 µm. « A » représente la distance entre l'apex et la BFS. On obtient dans ces deux simulations un aspect en cocarde. La surface plus cambrée et plus asphérique négative (en bas) est plus éloignée à la sphère de référence calculée, comme en témoignent l'augmentation de la valeur de A, et la distance plus grande de la plupart des points vis-à-vis de cette sphère.*

techniques modifient la géométrie du mur cornéen. La constatation d'une asphéricité oblate isolée au niveau de la face postérieure doit faire éliminer la présence d'un dysfonctionnement endothélial sévère, surtout s'il s'accompagne d'une augmentation de l'épaisseur cornéenne centrale (Fig. 7.14).

## Toricité

La toricité est la variation de la courbure entre les méridiens.

### En courbure

La différence de courbure entre les méridiens se traduit par une distribution radiale des couleurs, du méridien le plus plat (couleur la plus froide) au méridien le plus cambré (couleur la plus chaude). Si la courbure ne variait pas le long de chaque méridien (asphéricité nulle), une distribution parfaitement radiaire des couleurs serait obtenue sur la totalité de la carte topographique (Fig. 7.15).

En réalité, compte tenu de l'asphéricité concomitante de la surface cornéenne (aplatissement vers la périphérie), cette variation radiale est certes observée dans la région proche de l'apex de la face antérieure de la cornée, mais n'est pas aussi régulière en périphérie. Chaque méridien subissant une réduction de courbure périphérique pour les cornées prolates, on observe en général un « refroidissement » des couleurs vers la périphérie, ce qui donne au final un aspect de « sablier » ou de « nœud papillon » (*bow-tie* en anglais) (Fig. 7.16). Ainsi, la représentation de la courbure d'une surface cornéenne torique et asphérique épouse un profil en nœud papillon classique dans les cartes de courbure. Si la toricité domine au centre de la cornée, l'influence des variations de courbure liées à l'asphéricité se fait logiquement sentir vers la périphérie [4] (Fig. 7.17). Physiologiquement, chacun des méridiens d'une cornée torique possède une courbure dont les variations sont du type asphérique prolate (Fig. 7.18).

Pour une cornée torique et oblate (ex : kératoplastie transfixiante), un sablier de couleur froide est obtenu (Fig. 7.19).

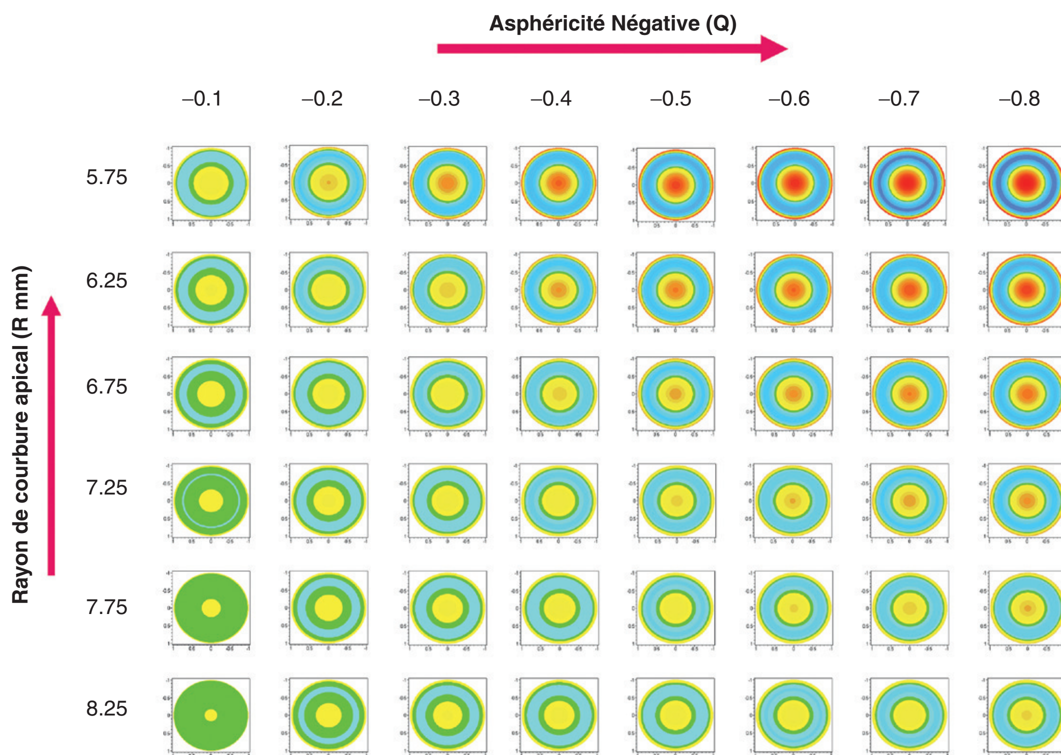



**Fig. 7.10. *Représentation des effets combinés de la cambrure apicale et de l'asphéricité négative sur le pattern d'élévation.***
*Les surfaces générées sont des conoïdes qui possèdent une symétrie de révolution (tous les méridiens d'une surface donnée sont identiques). Chaque surface est caractérisée par son rayon de courbure apical (en mm) et son degré d'asphéricité (Q). Pour une même cambrure apicale (indiquée par la valeur du rayon de courbure en mm), plus l'asphéricité négative est marquée, et plus l'aspect en cocarde est prononcé : l'élévation tend à être de plus en plus marquée vis-à-vis de la sphère de référence calculée (la distance entre l'apex cornéen et la BFS augmente). Pour une même asphéricité, augmenter la courbure apicale (diminution du rayon de courbure) produit des effets comparables. Les courbures apicales ont été choisies pour représenter les valeurs généralement rencontrées pour la surface antérieure (8,25, 7,75 et 7,25 mm), et la surface postérieure (6,75, 6,25 et 5,75 mm) de la cornée. Plus la cornée est cambrée au sommet et prolate, plus l'élévation centrale est importante. Ceci explique pourquoi la face postérieure de la cornée (physiologiquement plus cambrée et asphérique que la face antérieure) possède une élévation centrale plus importante que la surface antérieure.*

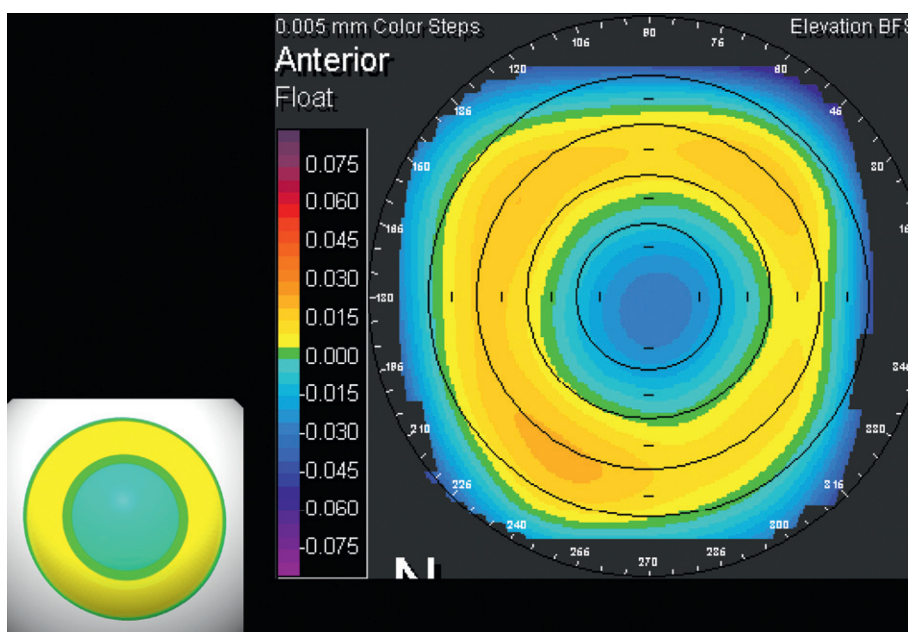



**Fig. 7.11. *Représentation en élévation d'une cornée oblate (à gauche : modélisation informatique, à droite : patient opéré de Lasik myopique).***
*La partie centrale de la cornée est située sous la sphère de référence.*

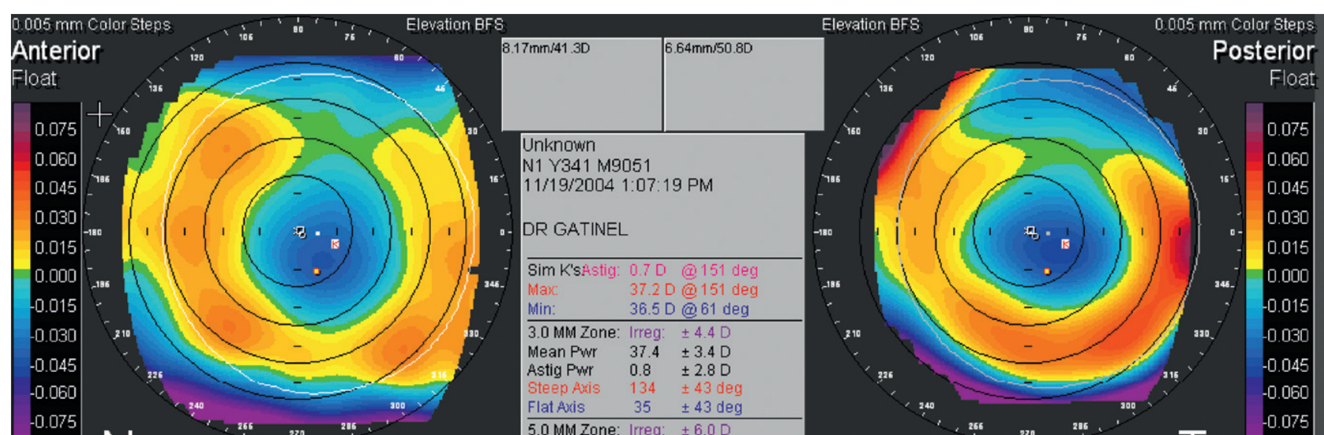



**Fig. 7.12. *Représentation en élévation d'une cornée après kératotomie radiaire.***
*À gauche : élévation antérieure ; à droite : élévation postérieure relative à une sphère de référence. Noter l'aspect évocateur d'asphéricité de type oblate, et le parallélisme entre les deux surfaces.*

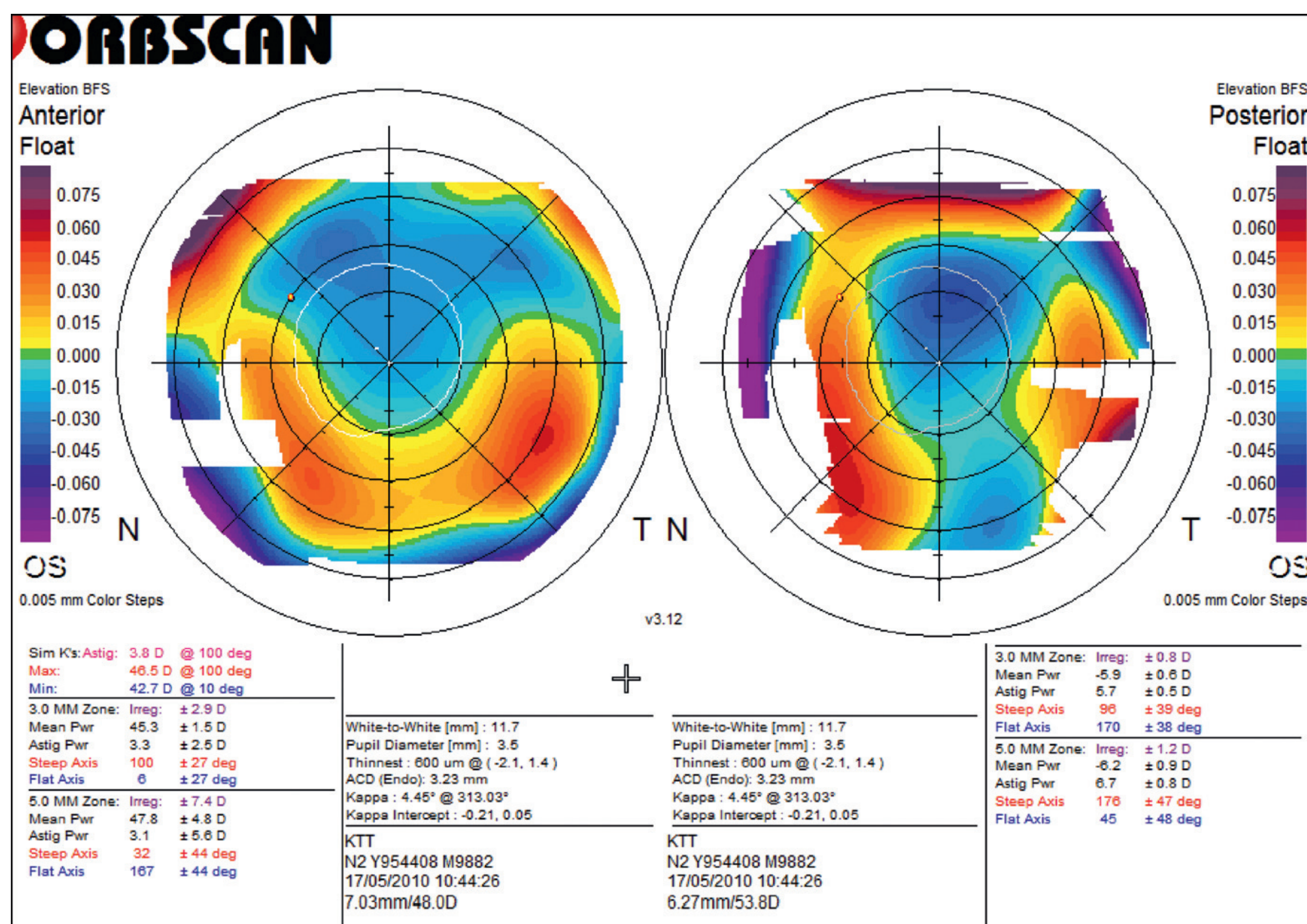



**Fig. 7.13. *Représentation en élévation d'une cornée après kératoplastie transfixiate.***
*À gauche : élévation antérieure, à droite : élévation postérieure (vis-à-vis d'une sphère de référence). Noter l'aspect évocateur d'asphéricité oblate (les points situés au centre des surfaces ont tendance à se situer sous la sphère de référence, l'élévation ainsi négative est représentée en couleurs froides). L'aspect d'asphéricité oblate est retrouvé au niveau des deux faces et il existe également un degré élevé d'irrégularité : ces caractéristiques sont fréquemment observées après kératoplastie transfixiante.*

## En élévation

La forme toroïdale de la cornée se traduit par une localisation différentielle des méridiens par rapport à la BFS, cette dernière ayant par définition un rayon de courbure unique dont la valeur est intermédiaire vis-à-vis de celle des rayons apicaux des principaux méridiens de la cornée.

Pour une cornée purement torique (tous les méridiens ont une forme parfaitement circulaire, la courbure variant entre ceux-ci), les méridiens plus plats sont situés entièrement au-dessus de la sphère (élévation positive, couleurs chaudes) et, à l'inverse, les méridiens plus cambrés sont situés au-dessous de la sphère (élévation négative, couleurs froides) (Fig. 7.20).

ORBSCAN

Fuchs
N2 Y954408 M10480
OD - 05/07/2010, 11:53:29

0.005 mm Color Steps — Anterior Float — Elevation BFS — 7.67mm/44.0D
6.74mm/50.1D — Elevation BFS — Posterior Float — 0.005 mm Color Steps

Fuchs
N2 Y954408 M10480
05/07/2010 11:53:29

Sim K's: Astig: 1.1 D @ 84 deg
Max: 45.7 D @ 84 deg
Min: 44.5 D @ 174 deg

3.0 MM Zone: Irreg: ± 1.5 D
Mean Pwr 45.0 ± 1.3 D
Astig Pwr 1.1 ± 0.9 D
Steep Axis 75 ± 39 deg
Flat Axis 164 ± 39 deg

5.0 MM Zone: Irreg: ± 1.5 D
Mean Pwr 44.8 ± 1.2 D
Astig Pwr 1.2 ± 0.9 D
Steep Axis 90 ± 39 deg
Flat Axis 169 ± 38 deg

White-to-White [mm] : 11.6
Pupil Diameter [mm] : 3.2
Thinnest : 647 um @ ( 1.6, 0.6 )
ACD (Endo): 2.68 mm
Kappa : 4.45 @ 211.29°
Kappa Intercept : -0.38, -0.01

OD

T — N

Keratometric — 1.0 D Color Steps — Axial Power
0.94 Pachymetry — Thickness — 20 mic Color Steps

**Fig. 7.14. Représentation en élévation d'une cornée ou l'on observe un aspect topographique d'élévation postérieure évocateur d'asphéricité oblate (en haut à droite), alors que la face antérieure (en haut à gauche : élévation, en bas à gauche : courbure axiale) conserve une géométrie prolate.**
*Cet aspect est concomitant d'une augmentation de l'épaisseur cornéenne centrale ; il est lié à la présence d'une dystrophie endothéliale (dystrophie de Fuchs), responsable d'une hydratation excessive du tissu cornéen. Le gonflement provoque une déformation plus marquée en face postérieure car le tissu stromal y est physiologiquement moins résistant.*

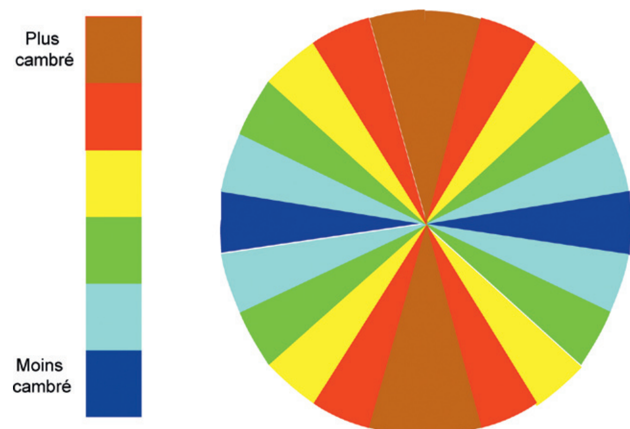



**Fig. 7.15. Conséquences de la toricité sur les cartes de courbure.**
*L'aspect obtenu est la conséquence de la variation de courbure entre les méridiens cornéens. Dans cet exemple, on néglige l'existence conjointe d'une asphéricité (la courbure le long de chaque méridien est constante). La Fig. 7.7 est donc la représentation schématique de la répartition des couleurs en topographie de courbure d'une cornée purement torique, dont les méridiens verticaux sont plus cambrés que les méridiens horizontaux (orientation de l'astigmatisme dit « conforme » ou « direct »).*

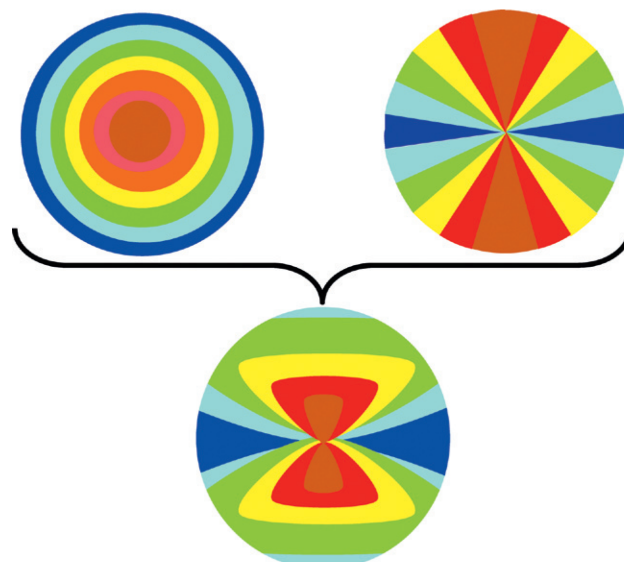


**Fig. 7.16. Le « nœud papillon » classiquement observé dans les cartes de courbures (et mieux restitué dans le mode axial) résulte de la combinaison des effets colorimétriques respectifs de la toricité et de l'asphéricité de la surface antérieure de la cornée.**
*Plus l'asphéricité est prolate, plus le refroidissement des couleurs vers la périphérie est rapide ; le sablier de couleurs chaudes apparaît alors « réduit » : ceci s'observe parfois dans le kératocône infraclinique débutant (augmentation de l'asphéricité prolate).*

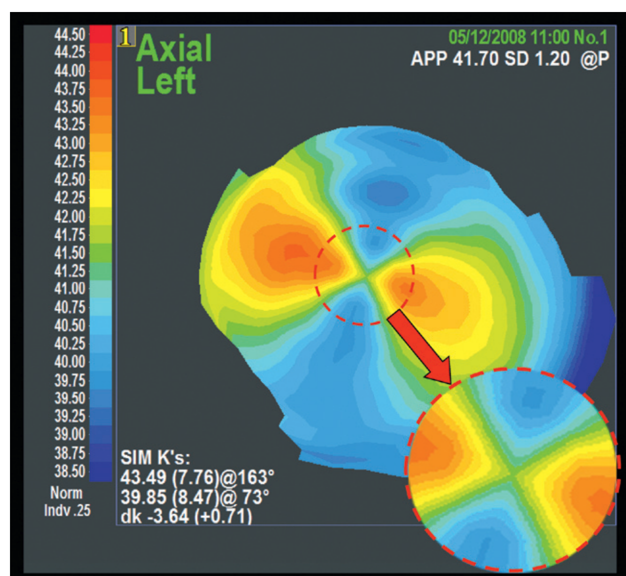



**Fig. 7.17. Représentation en courbure (mode axial), d'une cornée fortement torique.**
*Le méridien le plus cambré est situé sur l'axe 163°. La toricité domine largement la partie centrale où l'on observe un étalement quasi radiaire des couleurs (cf. l'agrandi en bas à droite), mais cet aspect se modifie vers la périphérie pour conférer à la carte globale une forme globale classique de « sablier » en raison de l'asphéricité prolate concomitante.*

Quand les couleurs chaudes correspondent à l'élévation positive (c'est le cas pour la plupart des logiciels topographiques), la carte d'élévation prend un aspect « opposé » à la carte de courbure. En effet, les méridiens les plus courbes sont situés sous la sphère de référence calculée (couleur froide car élévation négative), et représentés par des couleurs plus chaudes en courbure (Fig. 7.21).

La présence d'une asphéricité associée (responsable de l'aspect en nœud papillon des cartes de courbures) induit ici une asymétrie de distribution radiale de l'élévation, ainsi que de l'émergence en élévation positive d'une portion centrale variable des méridiens (d'autant plus importante que l'asphéricité associée est prolate). La Fig. 7.22 représente un tableau graphique qui révèle comment évoluent les patterns d'élévation quand on fait varier l'asphéricité et la toricité. Pour chaque surface testée, l'aspect en élévation résulte des rapports entre cette surface et la sphère de référence calculée.

Plus la toricité est marquée, plus la carte d'élévation apparaît comme divisée en quadrants alternant élévation positive et négative, et ce d'autant plus que l'asphéricité est nulle ; ou faiblement prolate. Si l'asphéricité négative s'accentue, les points centraux de la surface antérieure tendent à prendre une élévation positive (la partie centrale tend à former un îlot d'élévation positive et confère plutôt un aspect en « cocarde » à la carte d'élévation). L'aspect intermédiaire, en « promontoire » horizontal (vertical en cas de toricité « non conforme »), traduit l'existence d'un degré modéré d'asphéricité négative et de toricité (génératrice d'astigmatisme « direct » ou « conforme »). Il s'agit d'un aspect fréquemment rencontré en clinique (Fig. 7.23) [5]. Si la cornée présente une toricité inverse (astigmatisme « non conforme »), ce promontoire, aligné avec les méridiens les plus plats, prend une orientation verticale (Fig. 7.24).

En cas d'asphéricité oblate et de toricité marquée (kératoplastie transfixiante), l'aspect de la carte de l'élévation est logiquement inversé vis-à-vis de celui obtenu en cas d'asphéricité prolate ; les zones d'élévation négative occupent l'emplacement du « promontoire », et vice et versa (Fig. 7.25).

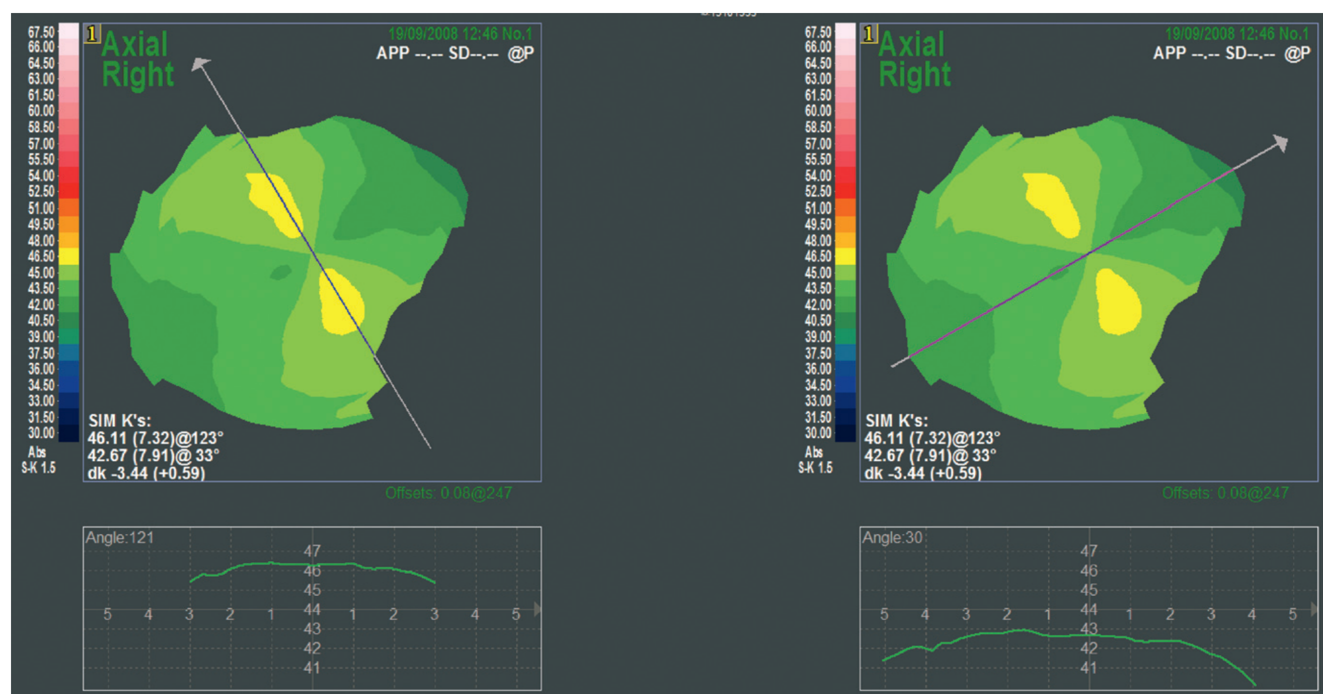



**Fig. 7.18. Représentation en mode axial (échelle de type absolu : Smolek-Klyce) des variations de courbure et du profil de courbure selon les méridiens principaux pour une cornée torique (axes de courbure extrêmes : 120°/30°, matérialisés par la direction des flèches selon lequel est calculé le profil représenté en dessous).**
*Le fait que la courbure décroisse vers les bords traduit l'existence d'une asphéricité de type prolate le long de ces méridiens.*

# Asymétrie

L'asymétrie est une différence de courbure marquée entre les hémiméridiens opposés (ex : hémiméridien 90°, hémiméridien 270°).

## En courbure

Une distribution asymétrique du gradient de courbure traduit la différence de courbure entre certains hémiméridiens opposés (Fig. 7.26). Cette caractéristique

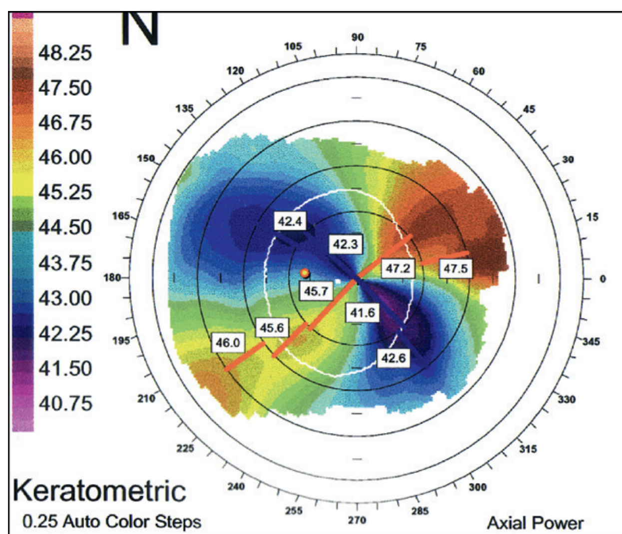



**Fig. 7.19. Représentation en courbure axiale après kératoplastie transfixiante.**
*L'asphéricité oblate, combinée à une importante toricité, est responsable d'un aspect en « sablier » de couleurs froides. L'axe des méridiens les plus cambrés (par des points de sutures plus serrés) est proche de 40°.*

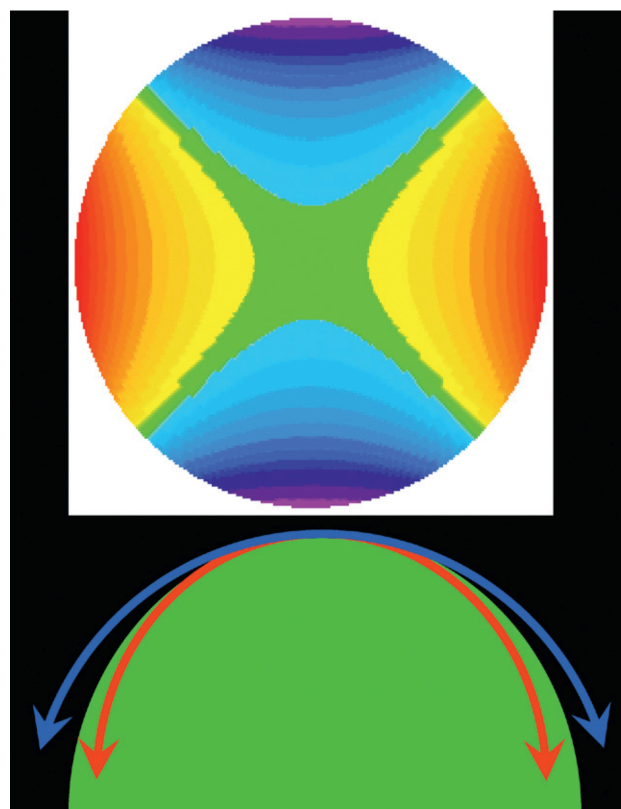


**Fig. 7.20. Représentation schématique en élévation d'une cornée torique (en haut).**
*Le niveau « zéro » correspond à celui de la sphère (couleur verte). Les points de la surface cornéenne situés au-dessus sont en couleurs chaudes, les points au-dessous en couleurs froides. Les méridiens verticaux sont les plus cambrés, et sont situés sous la sphère de référence (en bas, le profil des méridiens verticaux est matérialisé par la flèche courbée rouge). À l'inverse, les méridiens horizontaux, plus plats, sont situés au-dessus de la sphère (en bas, flèche courbée bleue). On note que certains méridiens intermédiaires sont pratiquement « confondus » avec la sphère (élévation nulle).*

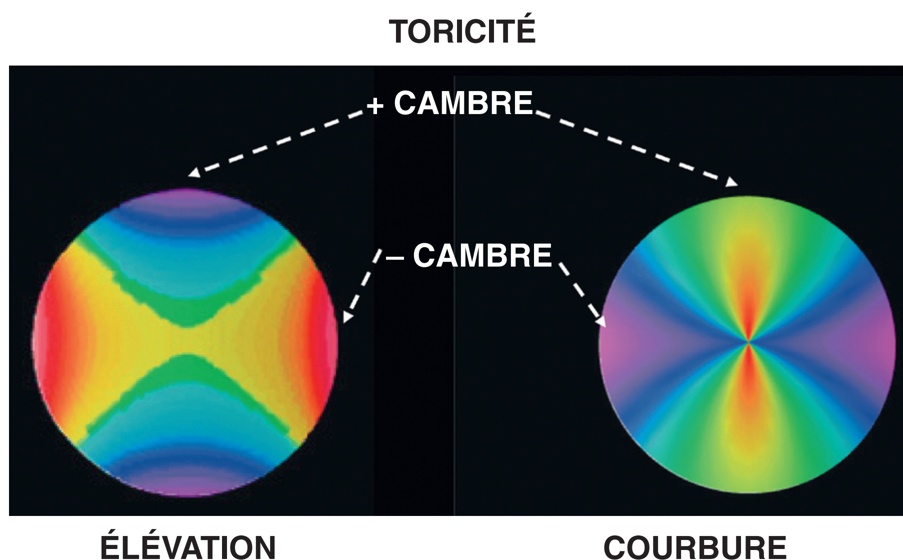



**Fig. 7.21. En topographie d'élévation, les points situés sous la sphère (et représentés en couleur froide) appartiennent aux méridiens les plus courbes, qui sont logiquement affectés de couleurs chaudes en représentation de courbure.**
*La réciproque est vraie pour les points situés au-dessus de la sphère qui correspondent aux méridiens les plus plats (couleurs chaudes en élévation, froides en courbures).*

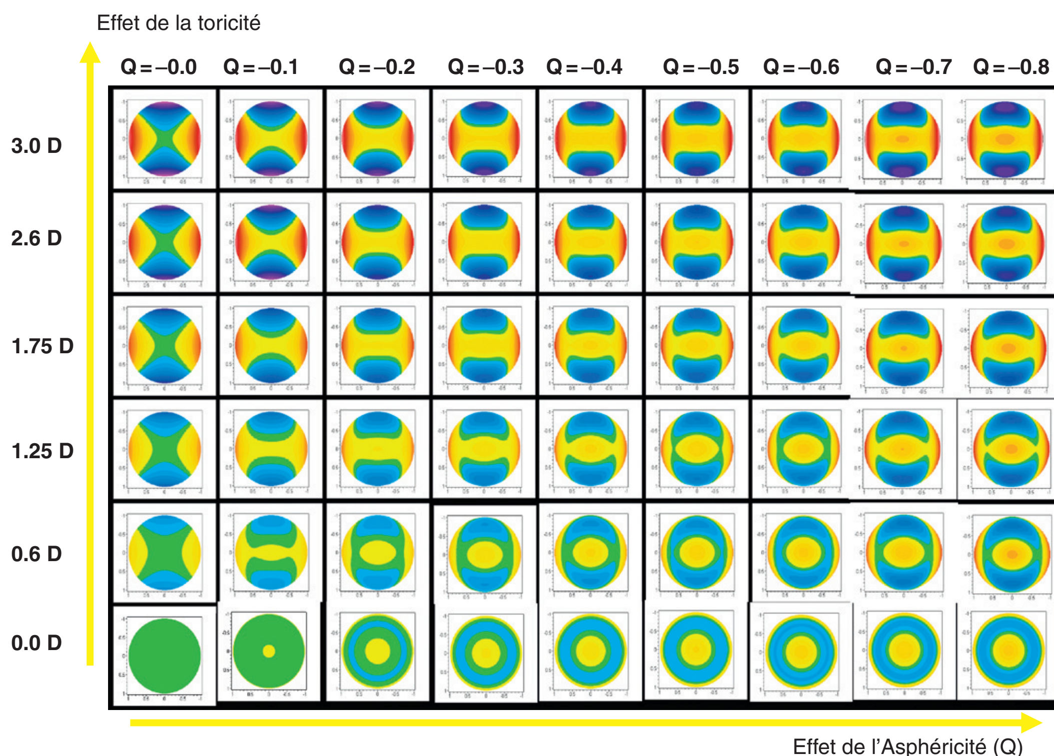



***Fig. 7.22.*** ***Représentation des effets combinés de l'asphéricité et de la toricité sur l'élévation.***
*Les surfaces cornéennes sont générées mathématiquement : pour chacune, on peut faire varier le degré d'asphéricité (Q) et de toricité. Pour chaque combinaison, un algorithme calcule une sphère de référence en mode « flottant », et représente l'élévation correspondante de la surface vis-à-vis de cette sphère. Rapportés à l'échelle de la cornée, les pas utilisés pour l'échelle d'élévation sont de 5 µm, et le diamètre cornéen analysé est de 10 mm. En abscisse, la valeur de l'asphéricité négative augmente (en valeur absolue) par pas de –0,1. En ordonnée, différents degrés de toricité (de nulle à 3,0 dioptries) sont représentés. Ils sont exprimés en dioptries de courbure, ils traduisent la différence entre le méridien horizontal — le plus plat — et le méridien vertical — le plus cambré.*

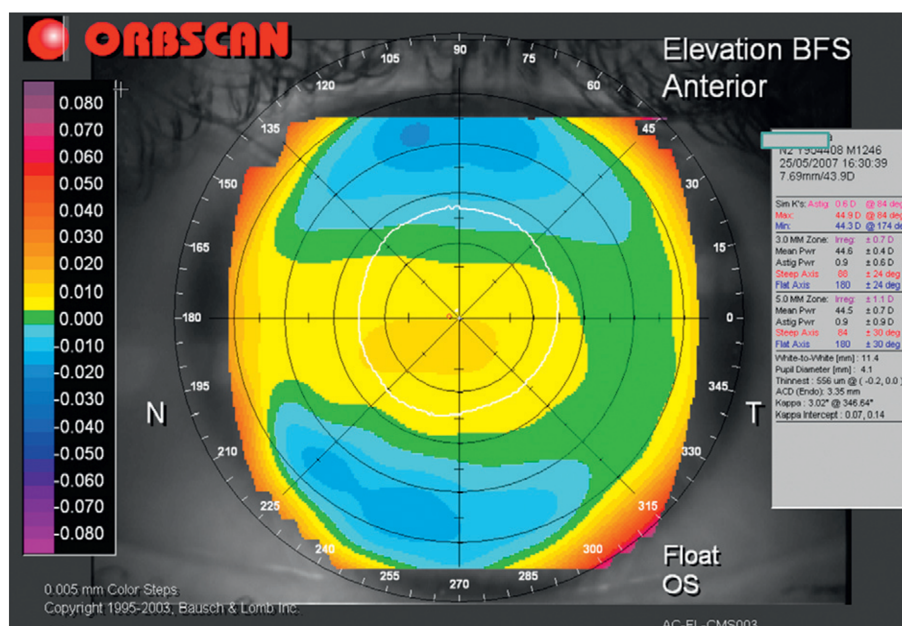



***Fig. 7.23.*** ***Aspect de promontoire horizontal en élévation, pour une cornée faiblement torique (les méridiens verticaux sont plus cambrés).***

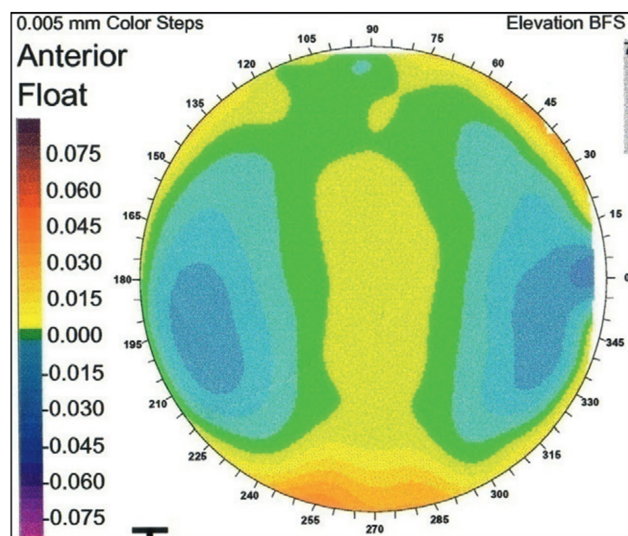



**Fig. 7.24.** ***Représentation en élévation d'un aspect en « promontoire vertical » : cet aspect est rencontré quand les méridiens horizontaux sont plus cambrés (astigmatisme cornéen de type inverse).***

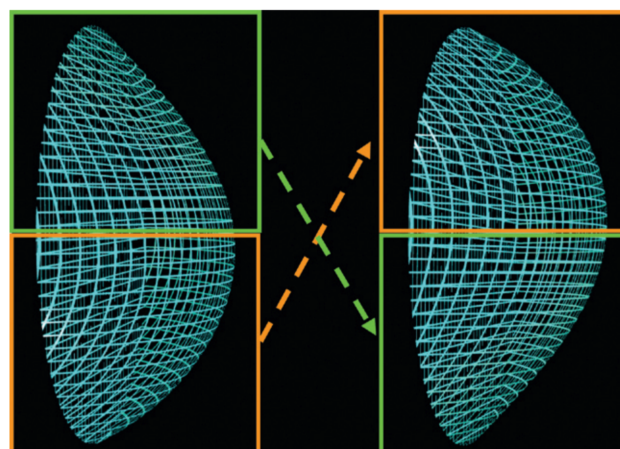


**Fig. 7.26.** ***Modélisation d'une surface convexe asymétrique (maillage bleu).***
*L'absence de symétrie axiale verticale fait que si l'on échange après les avoir retournées les moitiés supérieure et inférieure (à droite), la surface obtenue est globalement modifiée, et n'est plus identique à celle de départ. Les hémiméridiens appartenant à la moitié encadrée en vert sont globalement moins cambrés que ceux appartenant à la moitié encadrée en orange.*

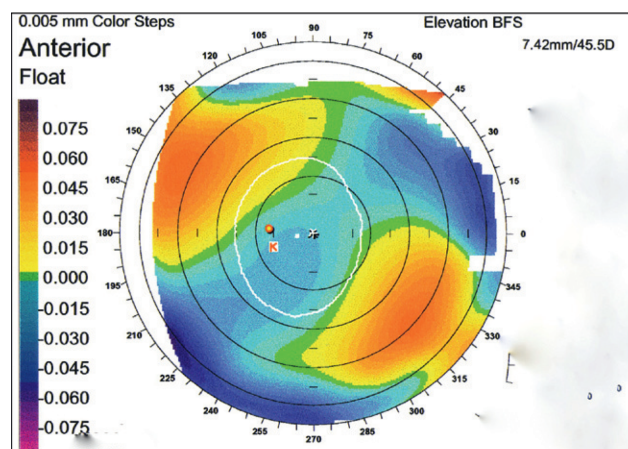



**Fig. 7.25.** ***Représentation en élévation d'une surface antérieure de cornée après greffe transfixiante (cf. Fig. 7.18 pour la représentation de cette même surface en topographie de courbure axiale).***
*L'aspect est conféré par la géométrie oblate et torique de la surface. Les points de la surface situés aux extrémités des méridiens les moins cambrés (situés de part et d'autre de l'axe 140°) sont situés au-dessus de la surface de référence calculée.*

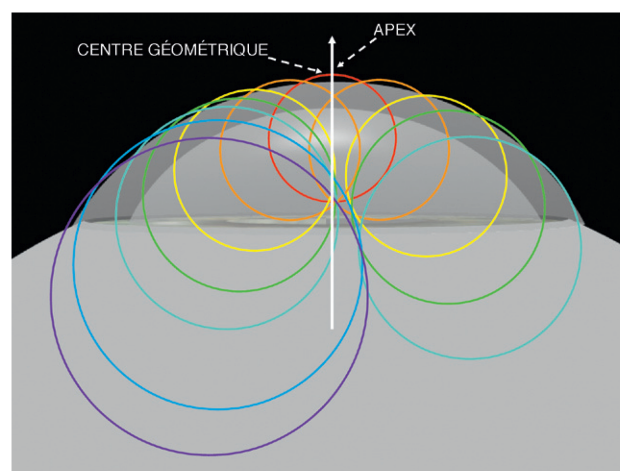



**Fig. 7.27.** ***Représentation schématique de la répartition asymétrique de la courbure (quantifiée ici par le cercle osculateur) le long d'un méridien de la surface cornéenne antérieure.***
*Dans cet exemple, l'apex (défini comme le point de courbure maximale) reste proche vis-à-vis du centre géométrique de la cornée, qui marque la démarcation entre les deux hémiméridiens constitutifs du méridien exploré. L'un des deux hémiméridiens (à gauche) possède une courbure qui tend à diminuer plus vite vers la périphérie. Ce type d'asymétrie s'observe couramment, entre la moitié nasale (aplatissement pus prononcé en périphérie) et la moitié temporale (aplatissement moins prononcé vers la périphérie) de la cornée antérieure.*

aboutit à la réduction de la symétrie axiale généralement observée dans les cartes de courbure par rapport à un axe épousant les directions des méridiens les plus plats ou les plus cambrés. Une distribution de la courbure asymétrique s'associe souvent avec un déplacement de l'apex qui s'éloigne de la région centrale, dans la direction des hémiméridiens les plus cambrés.

La cornée étant généralement légèrement plus plate dans sa portion nasale, un certain degré d'asymétrie horizontale (par rapport à l'axe vertical) est couramment retrouvé pour des cornées normales et elle se manifeste par des couleurs plus froides du côté nasal par rapport au côté temporal de la cornée, alors que l'apex demeure relativement central (Fig. 7.27 et 7.28).

Le ptérygion, dans sa forme évoluée, est responsable d'une asymétrie de courbure horizontale. Quels que soient les mécanismes exacts impliqués dans la formation de l'astigmatisme cornéen, l'aplatissement provoqué par le ptérygion prédomine dans la zone proche du front de l'excroissance. L'astigmatisme tant préopératoire que postopératoire est corrélé à la taille du ptérygion ; la toricité induite (aplatissement horizontal plus marqué dans la portion nasale) provoque l'apparition d'un astigmatisme irrégulier, dont la composante régulière est conforme (la composante irrégulière est représentée majoritairement par les aberrations de haut degré *Trefoil* et *Coma* ; Fig. 7.29). Le traitement chirurgical du

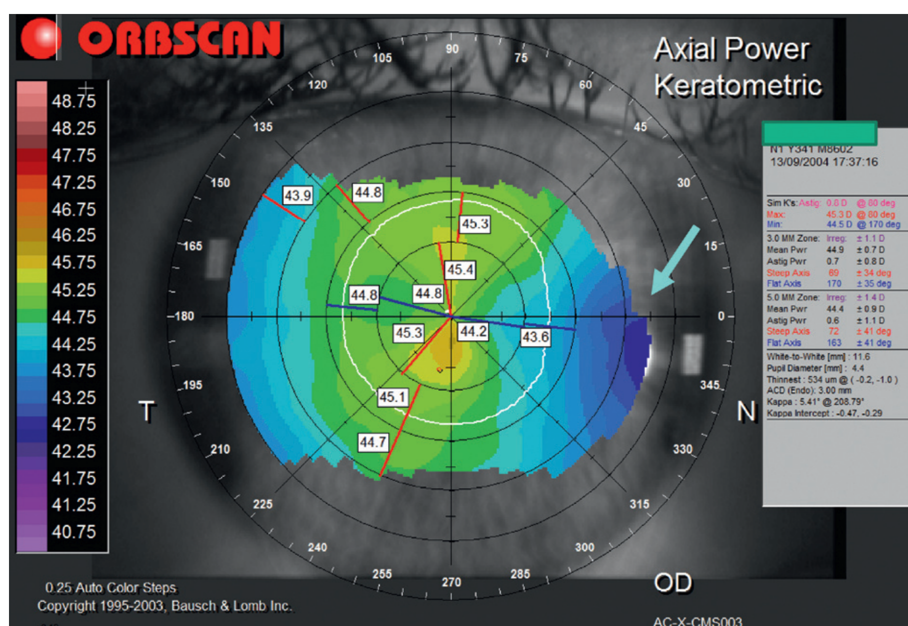



**Fig. 7.28. Représentation de la courbure en mode axial d'une cornée normale (œil droit, échelle personnalisée).** *L'asphéricité est de type prolate : noter l'aplatissement périphérique plus marqué en nasal (flèche).*

**Fig. 7.29. Asymétrie cornéenne induite par un ptérygion (en haut à gauche).**
*La carte de représentation de la courbure en mode axial d'une cornée normale (œil droit, échelle personnalisée) montre un aplatissement nasal prononcé, lié aux modifications du relief antérieur induites par le ptérygion, qui associent altération de la répartition du film lacrymal en regard de la tête du ptérygion et phénomènes de traction (noter l'importante déformation des mires sur l'image spéculaire du disque de Placido). Le calcul du front d'onde cornéen (en bas à gauche) permet de qualifier et quantifier l'astigmatisme irrégulier induit (élévation des aberrations de type* Trefoil, Coma *et* Tetrafoil *sur l'histogramme des aberrations cornéennes en bas à droite).*

ptérygion réduit de manière significative l'astigmatisme réfractif et améliore la régularité cornéenne.

Toute augmentation de l'asymétrie, en particulier quand elle est oblique ou verticale et associée à un déplacement de l'apex, doit faire suspecter la présence d'une maladie de la cornée telle que le kératocône ou la dégénérescence pellucide marginale (Fig. 7.30 et 7.31). Aux stades précoces du kératocône, l'asymétrie se caractérise souvent par un aspect de nœud papillon asymétrique (*Asymetric Bow tie* : AB) dont l'orientation suit la direction de la partie plus cambrée de la cornée. Aux stades les plus précoces (kératocône suspect), seule la présence d'une zone légèrement plus cambrée en paracentral inférieur peut être observée, avec une déviation de la direction d'un des hémiméridiens les plus cambré par rapport à l'autre (*Skewed Radial Axes* : SRAX) (Fig. 7.32). Aux stades avancés, l'asymétrie extrême se combine avec une asphéricité négative (prolate) plus importante et résulte en un aspect où ressort nettement une zone décentrée plus cambrée. Il est important de détecter et de quantifier l'asymétrie afin de pouvoir élaborer des outils de dépistage du kératocône en chirurgie réfractive.

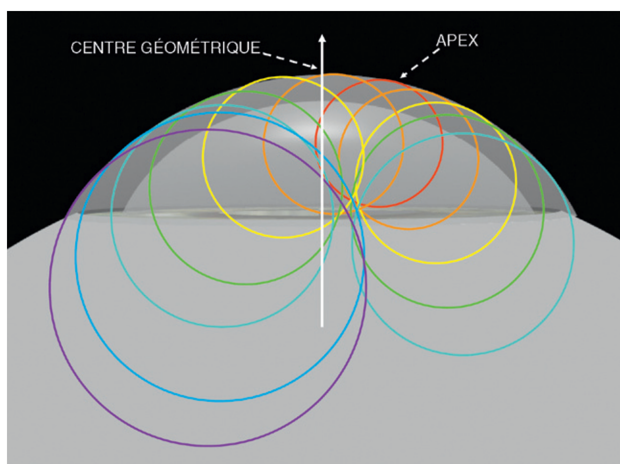



**Fig. 7.30. *Représentation schématique d'une répartition asymétrique de la courbure (quantifiée ici par les cercles osculateurs) le long d'un méridien de la surface cornéenne antérieure.***
*Dans cet exemple, l'apex (défini comme le point de courbure maximale) est latéralisé vis-à-vis du centre géométrique de la cornée, qui signe la démarcation entre les deux hémiméridiens constitutifs du méridien exploré. Ce type d'asymétrie est souvent observé chez les patients atteints de kératocône (l'apex se déplaçant typiquement en inféro-temporal).*

Divers indices issus des cartes de courbure et permettant de quantifier l'asymétrie ont été décrits, ils reposent sur les différences de courbures notées entre hémiméridiens et/ou hémicornée supérieure et inférieure. Ils sont utiles au dépistage du kératocône [6, 7].

## En élévation

L'asymétrie horizontale physiologique est responsable, dans les cornées normales, d'un léger décentrement temporal et de différences entre les points situés respectivement en temporal et nasal dans la distribution relative de leur élévation respective par rapport à la BFS.

Aux stades précoces du kératocône, l'asymétrie se traduit également en élévation par une réduction de la symétrie axiale par rapport à l'axe horizontal. Un léger décalage vers le bas de la bande d'élévation horizontale (« promontoire ») sur les cartes d'élévation de la cornée antérieure peut être observé (Fig. 7.33). L'asymétrie cornéenne peut être mieux dévoilée par l'utilisation d'une contrainte d'alignement (par exemple, mode *axis*) pour le calcul de la BFS puisque le mode *float* permet à la sphère de s'éloigner du centre, réduisant dès lors l'asymétrie apparente sur les cartes d'élévation (Fig. 7.34).

En pratique, la composante asymétrique n'est que très rarement isolée, et accompagne selon les circonstances cliniques divers degrés de toricité et d'asphéricité. Dans

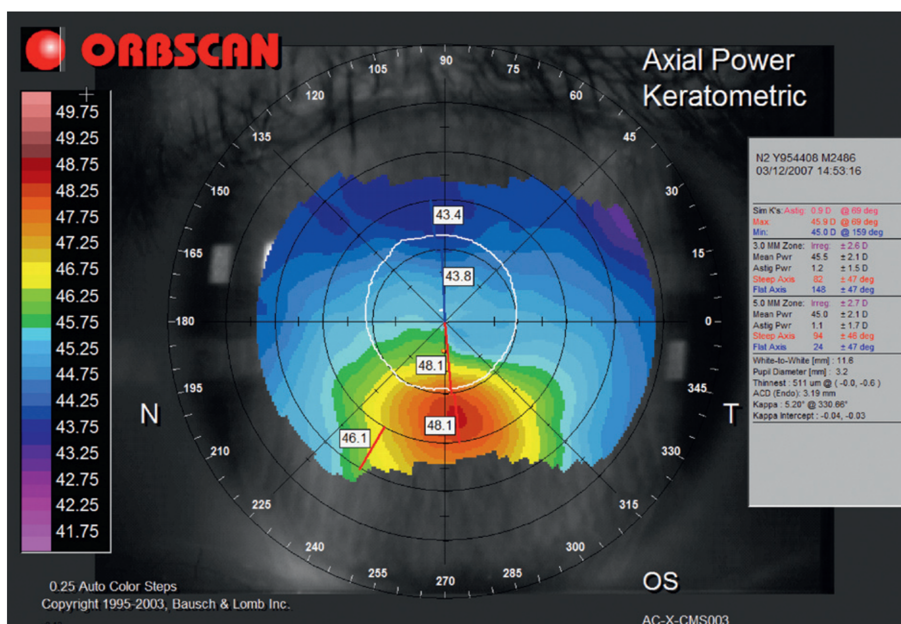



**Fig. 7.31. *Topographie spéculaire en mode axial (échelle relative personnalisée) d'une cornée présentant un kératocône.***
*Noter le fort gradient de courbure verticale, et le déplacement inférieur de l'apex en courbure axiale.*

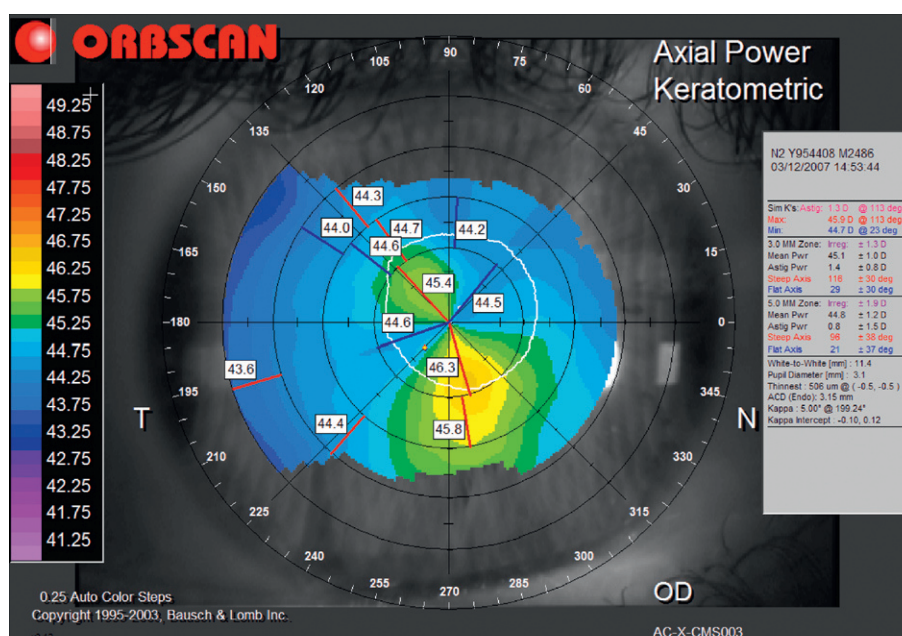



**Fig. 7.32. Représentation topographique en courbure axiale (échelle personnalisée) de l'œil adelphe (droit) d'un patient atteint de kératocône avancé de l'œil gauche.**
*La cornée de l'œil droit présente un des signes topographiques précoces de kératocône : noter l'asymétrie de la répartition de la courbure, associée à déplacement de l'apex en inféronasal. L'aspect réalisé est celui d'un nœud papillon asymétrique avec des hémiméridiens d'axes déviés (« AB-SRAX » pattern).*

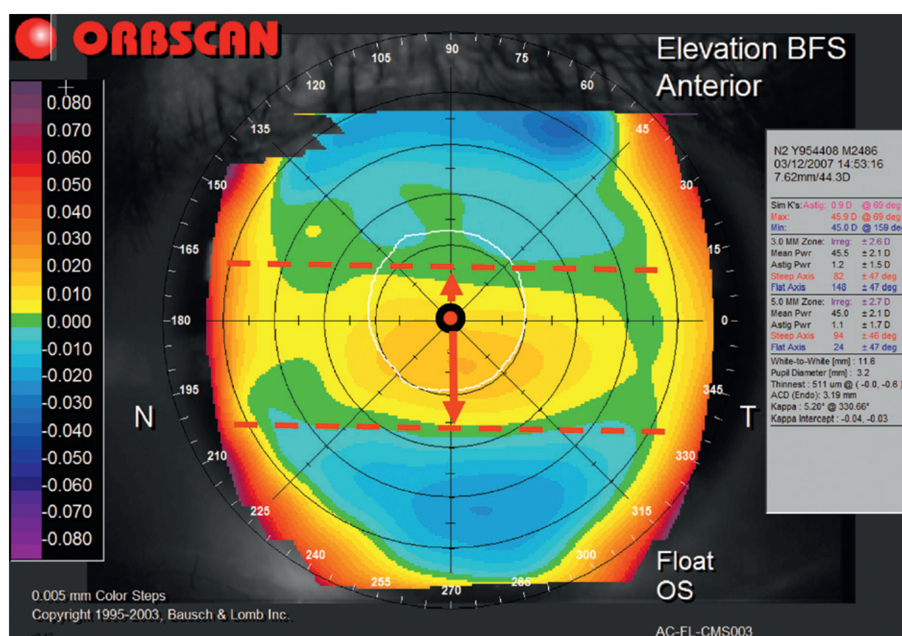



**Fig. 7.33. Topographie d'élévation de la surface cornéenne antérieure (mode float).**
*La cornée est prolate et torique (astigmatisme conforme) et présente une asymétrie marquée, qui se traduit par un décalage du promontoire horizontal vers le bas (noter la différence entre la distance supérieure et inférieure au centre géométrique de la cornée). La surface cornéenne analysée ici en élévation est représentée en courbure sur la Fig. 7.31.*

le kératocône, la toricité et l'asphéricité négative sont souvent plus prononcées.

La Fig. 7.35 résume les aspects topographiques caractéristiques observés en courbure et en élévation quand l'asymétrie se combine avec de l'asphéricité et/ou de la toricité.

Il est important de noter que l'interprétation clinique d'une asymétrie topographique repose sur le contexte clinique, et d'autres paramètres topographiques comme l'évolutivité, et l'existence ou non d'une asymétrie controlatérale comparable (préservation de l'énantiomorphisme, qui caractérise la symétrie en miroir entre œil droit et œil gauche).

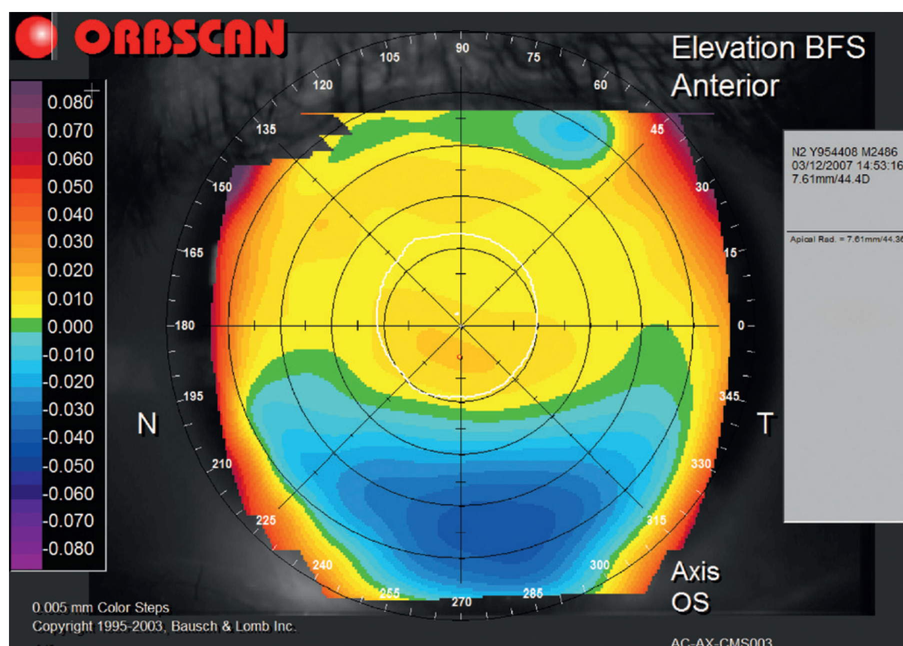



**Fig. 7.34. Représentation en élévation, en utilisant une contrainte d'alignement pour la sphère de référence (mode** axis**).**
*La sphère est contrainte de s'aligner sur le centre géométrique de la cornée. Cette contrainte permet de souligner l'asymétrie de la surface explorée. Les hémiméridiens les plus cambrés sont situés en inférieur, et sous la sphère de référence contrainte. Les hémiméridiens supérieurs, moins cambrés, sont logiquement situés au-dessus.*

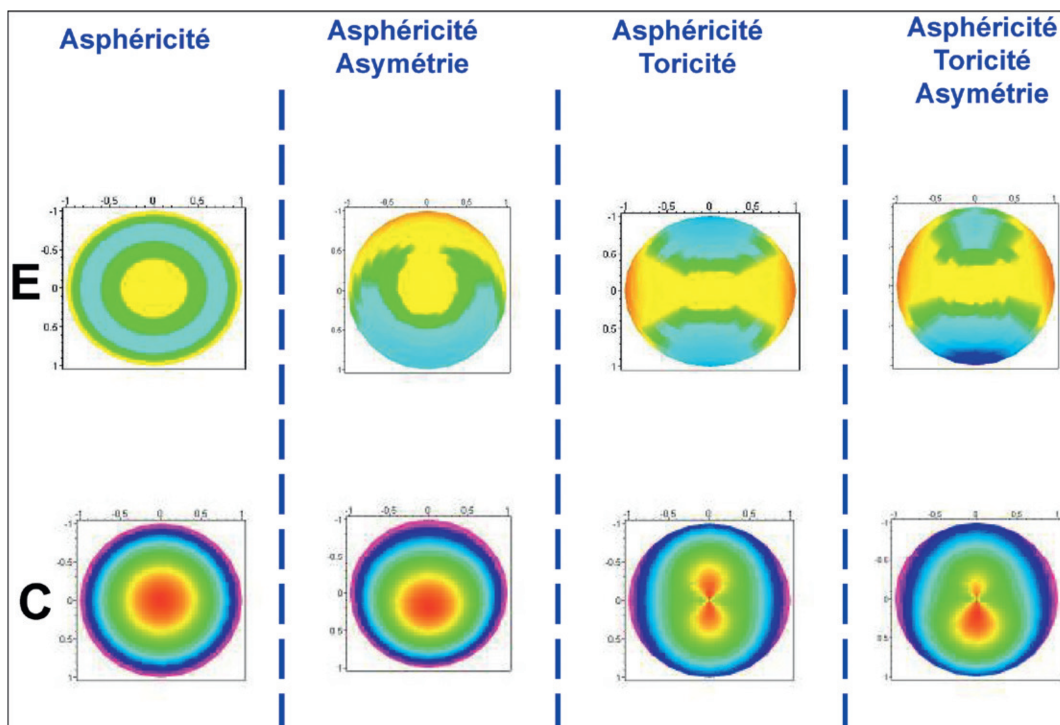



**Fig. 7.35. Simulation informatique de la représentation en élévation (E) et en courbure (C) de surfaces cornéennes en fonction de leurs propriétés géométriques élémentaires.**
*Les surfaces ont été générées par un logiciel de simulation mathématique, et un algorithme de calcul a été réalisé pour le calcul de la sphère de référence (représentation de l'élévation) et de la courbure axiale.*

## Irrégularité

Pour certains logiciels de topographes, le vocable « irrégularités » regroupe à la fois les manifestations de l'asymétrie et de l'irrégularité proprement dite. Selon nous, l'irrégularité correspond à des variations locales de courbure ou d'élévation non systématisées, qu'il n'est pas possible de rattacher à celles induit par l'asphéricité, la toricité ou l'asymétrie (Fig. 7.36).

La surface antérieure de la cornée présente physiologiquement un certain degré d'irrégularité, qui explique pourquoi deux cornées qui seraient globalement simi-

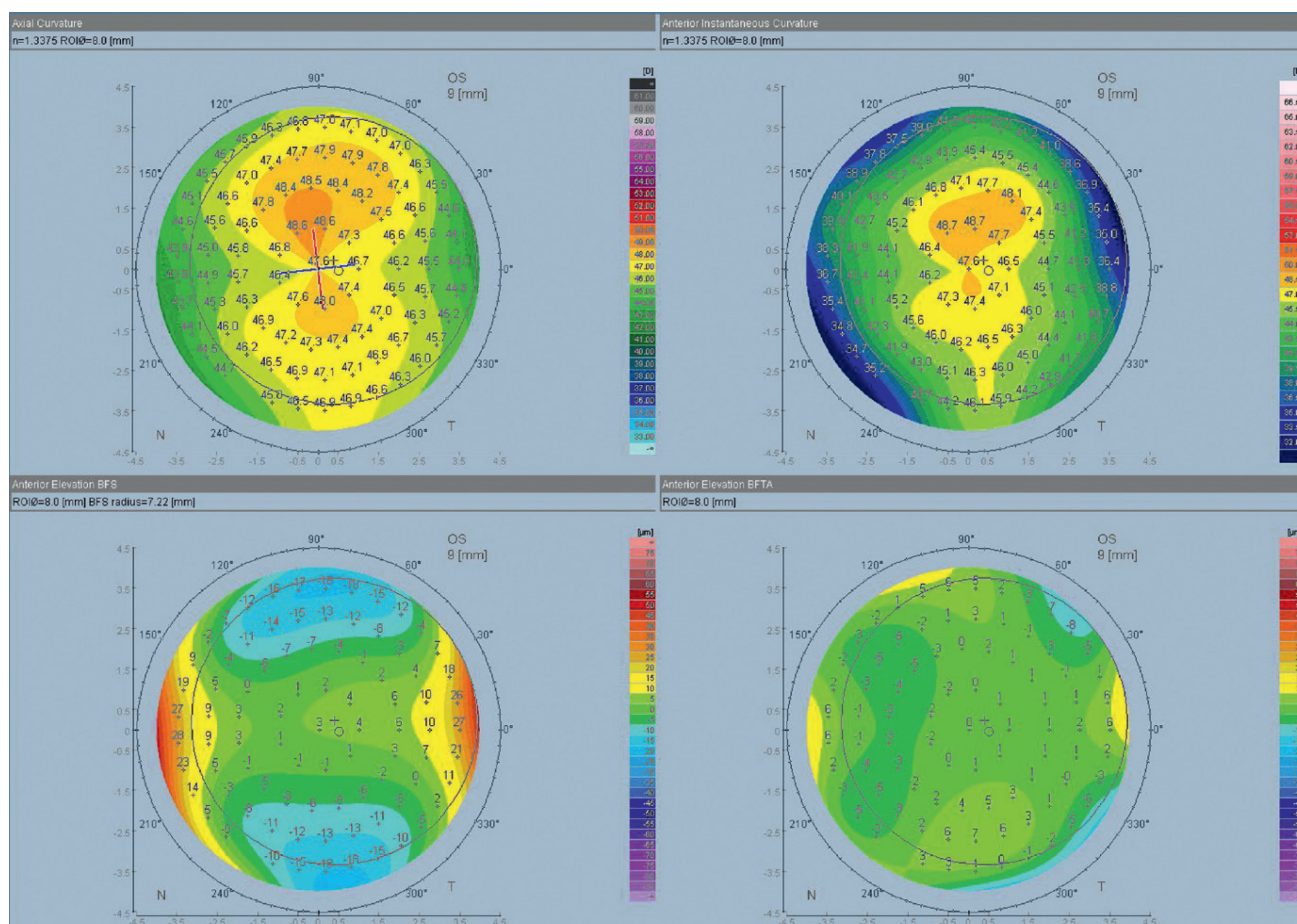



**Fig. 7.36. *Cette cornée analysée par le topographe Galilei (Ziemer) présente une légère irrégularité, responsable de la déformation asymétrique du « sablier » des cartes de courbure axiale (en haut à gauche), instantanée (en haut à droite).***
*En élévation relative à une sphère de référence (en bas à gauche), la carte est dominée par la toricité. L'utilisation d'une surface de référence torique et asymétrique permet de révéler l'irrégularité, qui apparaît comme une légère fluctuation non systématisée de l'élévation vis-à-vis du niveau « zéro » représenté par celui de la surface de référence asphérotorique.*

laires en termes d'asphéricité, toricité, etc. vont apparaître différentes d'un œil à l'autre. L'irrégularité est propre aux cartes topographiques issues de cornées mesurées en clinique (« réelles »), qu'elle différencie des simulations informatiques obtenues à partir de surfaces géométriques régulières. Une partie de l'irrégularité provient de la mesure elle-même : c'est le « bruit de fond » ; il est lié au caractère « fini » de la précision de la mesure.

Les irrégularités localisées (peu étendues) sont souvent mieux révélées par la topographie de courbure que l'élévation, surtout quand elles se situent à proximité du centre géométrique de la cornée. L'irrégularité peut être quantifiée par certains indices comme le SRI (*Surface Regularity Index*).

Quand l'irrégularité augmente voire prédomine sur une carte, il faut éliminer un artefact lié à un problème de réalisation de la mesure (ex : mouvements oculaires, clignement intempestif pendant la mesure). Il est indiqué de répéter l'examen en cas de doute.

La sécheresse oculaire est la principale cause par ordre de fréquence d'irrégularité topographique ; un film lacrymal réfléchit la lumière de façon d'autant plus diffuse et moins spéculaire qu'il est de mauvaise qualité. Le mauvais étalement des larmes lors des clignements entraîne une irrégularité qui fluctue lors d'examens très rapprochés (Fig. 7.37).

À l'inverse, une sécrétion lacrymale trop importante lors de la fixation peut induire une anomalie transitoire au niveau de l'image spéculaire et entraîner une fausse irrégularité, généralement située en regard du rebord palpébral supérieur ou inférieur.

Les autres sources d'irrégularité sont représentées par l'ensemble des affections cornéennes qui provoquent une atteinte de la surface antérieure de la cornée. Elles recouvrent une vaste entité nosologique qui englobe les affections congénitales (dystrophies) ou acquises (dégénérescence, kératocône, ptérygion, traumatisme, kératites, etc.). La chirurgie cornéenne est également source d'une élévation de l'irrégularité cornéenne au moins transitoire. L'induction d'un aspect d'îlot central topographique après chirurgie photoablative démyopisante est une forme d'irrégularité systématisée qui s'accompagne fréquemment d'une sous-correction (Fig. 7.38) : elle correspond en topographie spéculaire à une zone centrale de faible diamètre où la cambrure est accentuée. Il n'est pas toujours possible de visualiser les manifestations d'un îlot central en topographie d'élévation. Les techniques incisionnelles sont particulièrement pourvoyeuses d'irrégularité, qui affecte conjointement les faces antérieure et postérieure de la cornée.

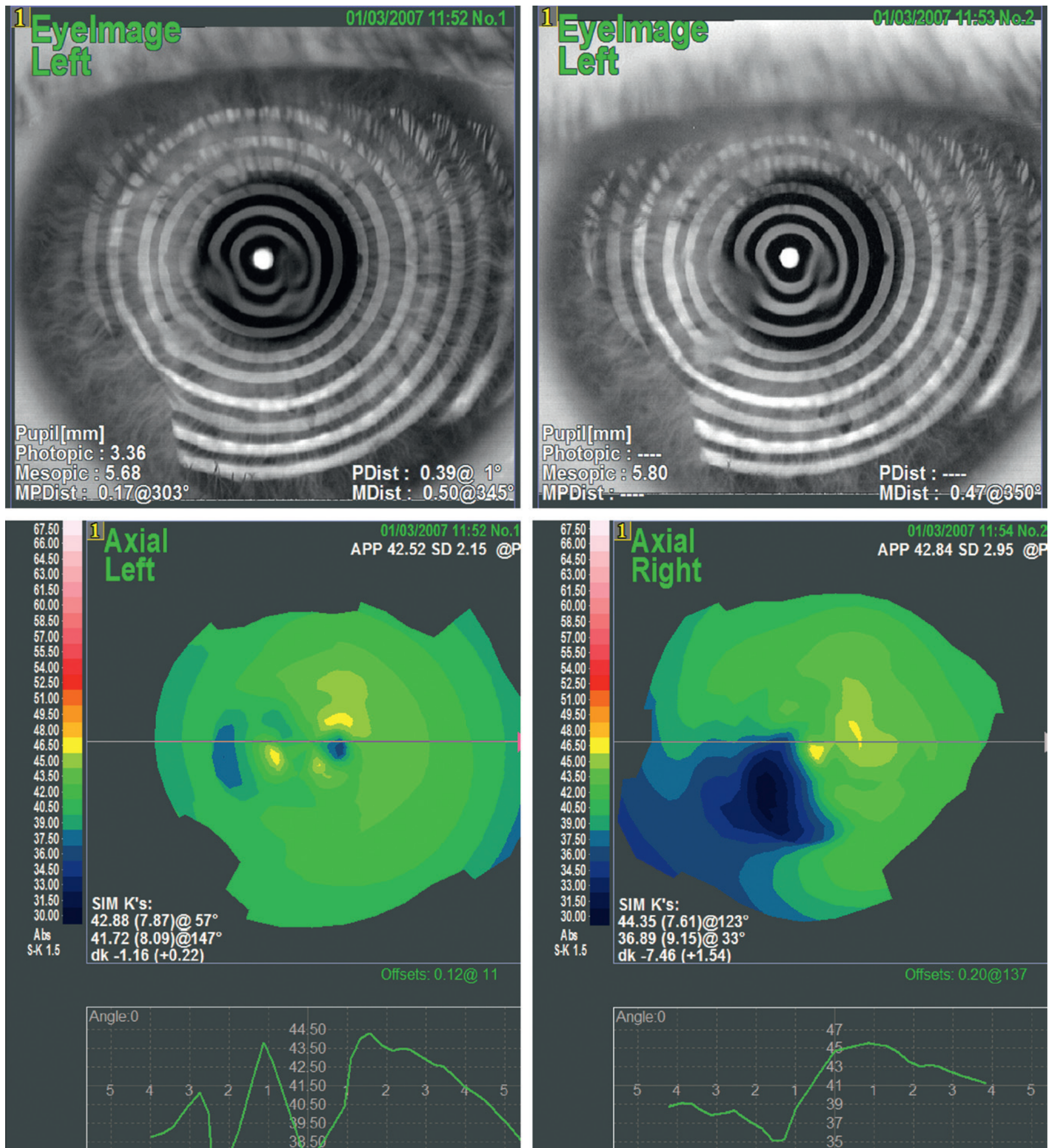



**Fig. 7.37. *Irrégularité de courbure liée à une sécheresse oculaire.***
*Les cartes ont été obtenues à une minute d'intervalle pour le même œil. Le mauvais étalement, voire la rupture localisée du film lacrymal altère les propriétés réflectives de la surface cornéenne (noter les distorsions locales extrêmes au niveau des cartes de Placido). Ceci résulte en l'apparition d'irrégularités non reproductibles au niveau de la carte de courbure axiale.*

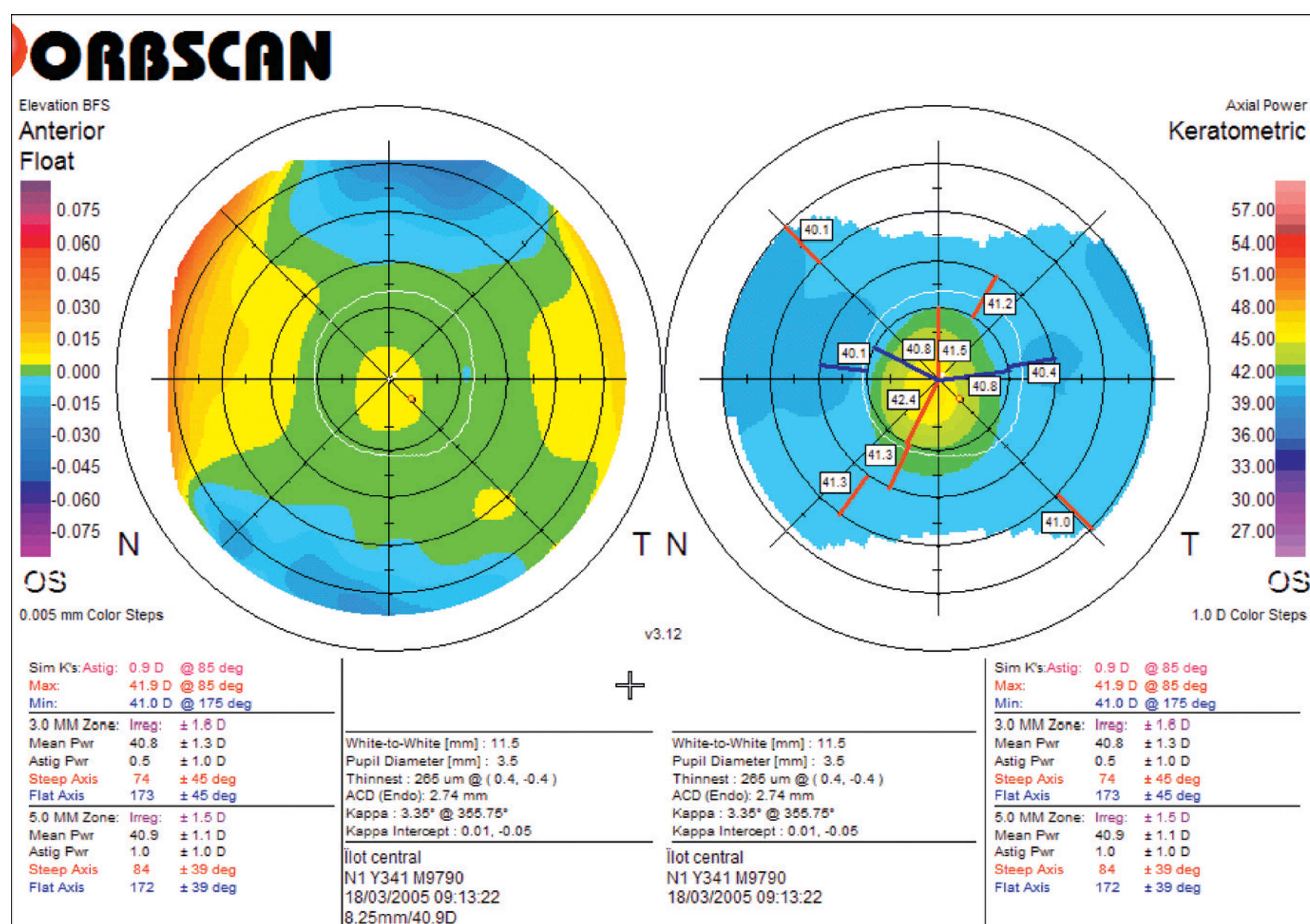



***Fig. 7.38.** Aspect d'îlot central de la face antérieure de la cornée après réalisation d'une photokératectomie à visée réfractive pour myopie.*
*À gauche : élévation relative à une sphère de référence. À droite : carte de courbure axiale. Noter qu'une faible accentuation de l'élévation positive (inférieure à 10 µm) peut, dans la zone centrale, être responsable d'une augmentation franche de la cambrure (2 dioptries environ dans cet exemple). Le traitement réfractif avait été effectué en 1995, avec un système de délivrance du rayonnement excimer de première génération. Si la plupart des îlots centraux observés après photoabation de surface régressaient avec le temps, celui-ci persistait 10 ans après la chirurgie initiale.*

## Références

[1] Mandell RB, St Helen R. Mathematical model of the corneal contour. Br J Physiol Opt 1971 ; 26 : 185–97.
[2] Burek H, Douthwaite WA. Mathematical models of the general corneal surface. Ophthalmic Physiol Opt 1993 ; 13 : 68–72.
[3] Gatinel D, Malet J, Hoang-Xuan T, Azar DT. Corneal elevation topography : best fit sphere, elevation distance, asphericity, toricity and clinical implications. Cornea 2011 ; in press.
[4] Keller PR, Reid PG, van Saarloos PP. Corneal topography bow-tie pattern : artifact of videokeratoscopy ? J Cataract Refract Surg 1997 ; 23 (9) : 1339–44.
[5] Gatinel D, Malet J, Hoang-Xuan T, Azar DT. Corneal Elevation Topography : Best Fit Sphere, Elevation Distance, Asphericity, Toricity, and Clinical Implications. Cornea ; 2010 Dec 15.
[6] Maeda N, Klyce SD, Smolek MK, Thompson HW. Automated keratoconus screening with corneal topography analysis. Invest Ophthalmol Vis Sci 1994 ; 35 (6) : 2749–57.
[7] Rabinowitz YS, Rasheed K, Yang H, Elashoff J. Accuracy of ultrasonic pachymetry and videokeratography in detecting keratoconus. J Cataract Refract Surg 1998 ; 24 (2) : 196–201.

# Annexe – Éléments de géométrie et de modélisation cornéenne utiles en topographie cornéenne

La cornée est le plus puissant des dioptres de l'œil. Elle doit cette propriété à l'importante différence d'indice entre l'air et le film lacrymal au niveau de sa face antérieure. De fait, les propriétés topographiques et optiques de la cornée sont intimement liées. Cette annexe est une présentation générale et simplifiée des figures géométriques et fonctions analytiques qui permettent de modéliser le profil et le relief de la cornée. Les propriétés de ces outils mathématiques sont largement utilisées en topographie cornéenne pour définir certaines constantes et indices; de fait quelques redites avec des éléments abordés de manière certes moins mathématisée dans certains des chapitres précédents sont inévitables.

## Généralités

L'étude morphofonctionnelle de la cornée requiert une précision de l'ordre du micron car des variations cet ordre peuvent induire des modifications significatives de ses propriétés optiques (la chirurgie réfractive photoablative cornéenne repose sur cette propriété) [1]. Ce lien entre morphologie et fonction est certainement le plus étroit pour les tissus de l'organisme. La formulation mathématique offre simultanément une représentation schématique (modélisation) et un outil permettant d'explorer les caractéristiques physico-optiques de la cornée [2–4].

La cornée est un tissu vivant, et sa structure évolue au long de la vie. Les descriptions que nous aborderons dans ce chapitre se réfèrent à la cornée moyenne de l'adulte. L'étude des formes est une science en soi qui se rattache à la géométrie. La description du relief cornéen qui en constitue une branche requiert l'usage d'un vocabulaire précis, dont les termes sont empruntés à l'étude géométrique des surfaces courbes. Afin d'éviter les erreurs d'interprétation et d'aider à la visualisation de notions parfois complexes pour le non-géomètre, il est particulièrement important de bien connaître le sens des termes utilisés. Les surfaces utilisées pur la modélisation ont une formulation analytique plus ou moins complexe, qui seront réduites ou simplifiées dans ce chapitre, le lecteur intéressé étant invité à consulter les références bibliographiques pour plus de détails.

Ainsi, seuls les traits principaux de la géométrie cornéenne, et leurs variations consécutives à des procédures comme la kératoplastie transfixiante ou la photoablation à visée réfractive seront abordés dans ce chapitre.

Nous commencerons par rappeler les définitions des termes les plus fréquemment employés, avant d'aborder l'étude des principales caractéristiques géométriques de la cornée dont sa courbure. Les principaux modèles mathématiques utiles à la description précise de la géométrie cornéenne dans le cadre de l'adaptation contactologique seront ensuite considérés. En plus d'illustrer certaines propriétés géométriques de la cornée, ces connaissances permettent d'accéder à la compréhension et l'interprétation des différentes cartes topographiques [5].

## Définition des termes employés pour la description mathématique des surfaces cornéennes et leur courbure

La description précise des variations de la courbure cornéenne fait appel à divers outils géométriques de complexité variable, et dont il est important de connaître les caractéristiques précises.

### Description générale

La courbure est objet mathématique défini dans un espace particulier. Dans le cadre de notre étude, la cornée est assimilée à un organe dont le volume est délimité par deux surfaces courbées dans un espace tridimensionnel. Dans le cadre de l'étude des propriétés géométriques des surfaces cornéennes, la courbure peut être définie comme celle de la sphère qui épouse «au mieux» la surface cornéenne en un point donné [6]. Plus le rayon de cette sphère est faible, plus la courbure de la surface étudiée est importante au point considéré, et inversement. Le profil d'une surface cornéenne peut être étudié «en coupe», selon la direction de ses méridiens, qui découpent la cornée en autant d'intersections qui passent son sommet ou apex; la courbure en un point de chaque méridien est égale à celui du cercle dit «osculateur» au point considéré (Fig. 7.39). Chaque méridien cornéen peut être défini par son azimut (l'azimut du méridien vertical est par exemple égal à 90°). Il est parfois utile de considérer qu'un méridien est constitué de deux hémiméridiens, dont la courbure est identique en l'absence d'asymétrie.

La courbure d'une surface varie selon l'endroit et la direction selon laquelle on la mesure, à deux excep-

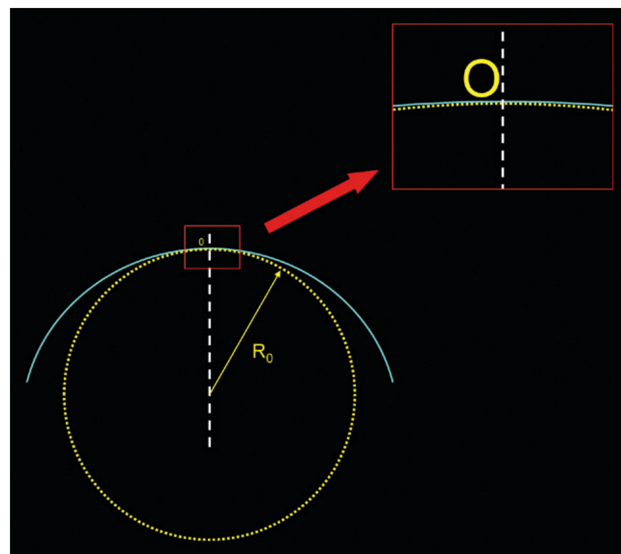



**Fig. 7.39.** *Étude «en coupe» du profil d'une surface cornéenne.* *Le méridien est représenté en vert. Le cercle osculateur est celui qui en épouse le sommet. Dans cette région apicale, les deux courbes sont pratiquement confondues (elles le sont réellement au sommet du méridien O). $R_0$ est le rayon du cercle osculateur, dont la valeur peut être utilisée pour calculer la puissance optique apicale du méridien.*

tions près : l'ensemble des points situés sur une surface purement sphérique, et le point situé au sommet d'une surface à symétrie de révolution (surface sans toricité apicale, dont tous les méridiens ont le même profil). En d'autres termes, la courbure réelle en un point d'une surface quelconque (non sphérique) n'est pas égale à l'une de celles que l'on mesurerait le long des différentes directions passant par ce point (Fig. 7.40).

Quand on étudie les variations de la courbure en fonction des directions passant par un point situé sur une surface localement non sphérique, on observe que la courbure varie toujours entre deux extrêmes, situés selon des directions perpendiculaires (Fig. 7.41). Les ophtalmologistes emploient parfois le terme d'astigmatisme local pour désigner cette caractéristique propre à la surface cornéenne, bien que le terme de « toricité locale » soit plus approprié. Cette toricité locale est responsable de l'« astigmatisme des faisceaux obliques », aberration optique pouvant affecter la réfraction de faisceaux lumineux d'incidence oblique [7]. Ainsi, l'existence d'une toricité locale non nulle en tout point est une caractéristique propre aux surfaces non sphériques. La variation de la courbure en un même point d'une surface en fonction de la direction de mesure est à l'origine des différents modes de représentation topographique (ex : mode axial, mode méridional, etc.). La valeur de la courbure moyenne (*mean curvature*) en un point d'une surface donnée correspond à une moyenne calculée à partir des valeurs mesurées selon chacune des directions passant par ce point.

En ophtalmologie, l'emploi du terme toricité désigne souvent implicitement l'existence d'une variation méridionale de la courbure au niveau du sommet cornéen (courbure apicale). Dans ce cas, la différence de courbure apicale mesurée entre le méridien le plus courbe et le méridien moins courbe (estimée cliniquement par la mesure de la kératométrie simulée : Sim-K) peut être utilisée pour calculer l'astigmatisme réfractif engendré par la cornée.

Si la toricité apicale correspond à une variation de courbure entre les méridiens au sommet de la cornée, l'asphéricité caractérise la variation de la courbure le long d'un méridien (du centre vers la périphérie cornéenne) [8] (Fig. 7.42). En effet, la courbure des méridiens d'une surface asphérique n'épouse pas celle d'un cercle mais varie en chacun des points du méridien considéré.

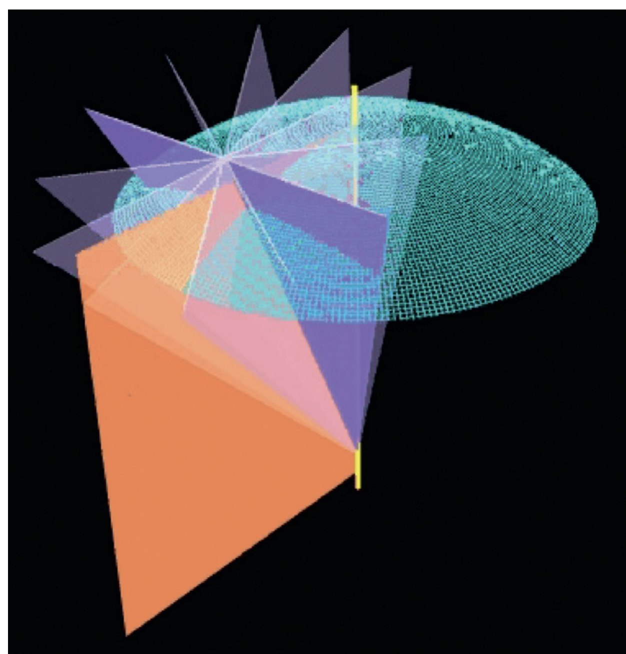


**Fig. 7.40.** ***Représentation de différents plans de coupe selon lesquels il est possible de mesurer la courbure d'une surface en un point donné.***

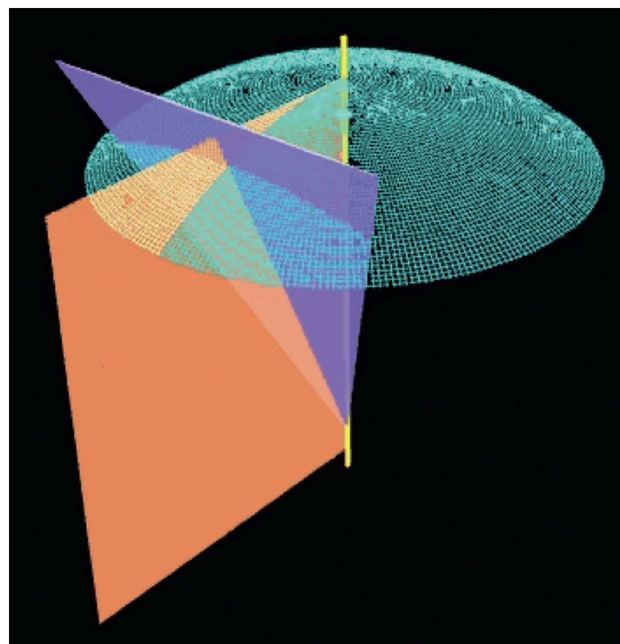


**Fig. 7.41.** ***Représentation des plans de coupe selon lesquels la courbure mesurée en un point de la surface (ici une calotte ellipsoïdale) peut être mesurée.***

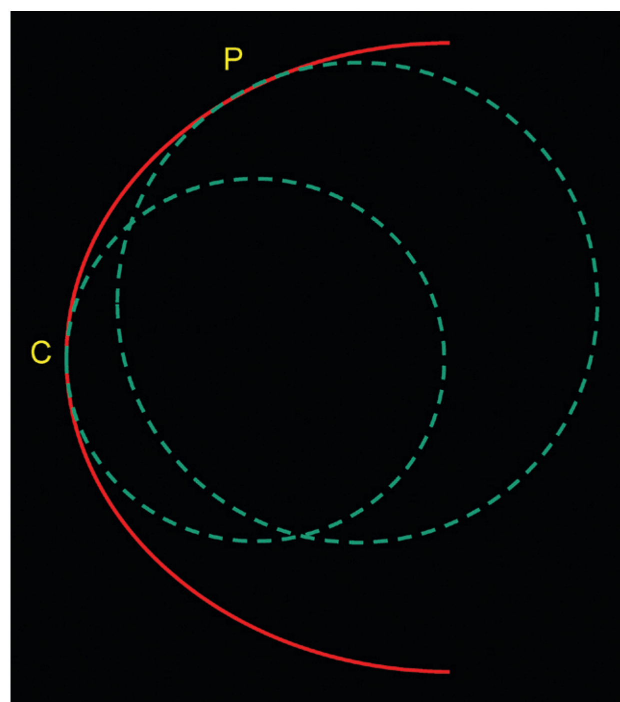



**Fig. 7.42.** ***Méridien asphérique : la courbure varie entre le centre et la périphérie (ici la courbure est représentée au sommet C et en un point périphérique P).***
*La courbure au sommet du méridien est appelée courbure « apicale ».*

Ces notions capitales pour l'étude du relief des surfaces cornéennes seront développées dans le paragraphe suivant.

## Descripteurs de la courbure cornéenne

La géométrie des surfaces cornéennes antérieures et postérieures est dictée par la combinaison de quatre propriétés élémentaires : courbure apicale, asphéricité, toricité et asymétrie. Ces propriétés s'attachent à décrire les variations de la courbure cornéenne entre les méridiens ou le long de ceux-ci. L'utilisation de ces propriétés permet de bâtir une sémiologie simple et pertinente pour l'interprétation des cartes topographiques.

Schématiquement :

– la courbure apicale conditionne la valeur de la puissance kératométrique paraxiale;
– de l'asphéricité dépendent le taux et le signe de l'aberration sphérique d'origine cornéenne;
– de la toricité (entendue ici au sens « toricité apicale ») découle la magnitude de l'astigmatisme cornéen;
– l'asymétrie est intimement liée au diagnostic précoce du kératocône, et gouverne le taux d'astigmatisme irrégulier (aberrations optiques de haut degré d'origine cornéenne).

### *Courbure apicale*

Le rayon de courbure apical moyen est défini comme celui de la sphère qui « épouse » au mieux la courbure du sommet de la cornée (sphère osculatrice). Les méridiens cornéens sont individualisés par des coupes sagittales passant par le centre de la cornée; la courbure apicale d'un méridien cornéen peut être assimilée à celui de son cercle osculateur, qui est « tangent » au sommet du méridien. En cas de toricité importante, la courbure apicale varie selon les méridiens entre deux valeurs extrêmes.

Pour une cornée saine et vierge de chirurgie réfractive, la valeur de la courbure apicale moyenne antérieure est généralement proche de celle fournie par la kératométrie moyenne, bien que cette dernière soit estimées à partir de mesures pratiquées à légère distance de part et d'autre du sommet cornéen (1,5 mm environ). Ceci est dû au faible gradient de courbure existant au sein de la région proche de l'apex cornéen (région apicale ou paraxiale) dans des conditions physiologiques.

La courbure apicale postérieure est physiologiquement plus marquée que la courbure apicale antérieure (son rayon de courbure apical est plus faible). Si la courbure de sa face postérieure est supérieure à celle de la face antérieure, la différence d'indice avec l'humeur aqueuse est environ 10 fois plus faible et de signe opposé. L'essentiel du pouvoir du dioptre cornéen dépend donc de sa face antérieure, et est légèrement atténué par sa face postérieure.

Le Tab. 7.1 renseigne sur les valeurs de courbures apicales rapportées par divers auteurs [9–16].

En plus de l'adaptation contactologique de routine, l'utilisation de la kératométrie apicale moyenne suffit dans des situations cliniques courantes comme le calcul biométrique de puissance d'implant ou le choix d'un anneau de microkératome.

En contactologie, la mesure kératométrique est naturellement exprimée en millimètres. Dans d'autres situations cliniques, la kératométrie est souvent exprimée en dioptries, qui est pourtant une unité de puissance optique, et non de courbure. Cette « transgression » souligne à la fois l'intérêt porté à l'estimation de la puissance optique du dioptre cornéen, et le lien si étroit qui unit la forme et la fonction de la cornée. La conversion de la kératométrie en dioptries nécessite l'utilisation d'une valeur d'indice de réfraction qui est généralement proche de 1,333. La relation entre kératométrie et courbure s'exprime alors par la relation suivante : $K = (1{,}333\text{-}1)/R$, où K est la kératométrie (en dioptries), et R le rayon de courbure apical (en mètre).

Cette valeur choisie d'indice ne correspond pas à une valeur physique (proche de 1,376 pour le stroma). Cependant, cette légère réduction permet à la kérato-

Tableau 7.1
Valeurs du rayon apical de courbure R et des puissances dioptriques F correspondantes [9–16]

| | S/Y | Face antérieure | | Face postérieure | | Puissance totale (D) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | R (mm) | F (D) | R (mm) | F (D) | |
| Lowe et Clark (1973) | 46/92 | 7,65 ± 0,26 | 49,2 | 6,46 ± 0,26 | –6,2 | 43,2 |
| Kiely *et al.* (1982) | 88/176 | 7,72 ± 0,27 | 48,7 | | | |
| Edmund et Sjontorft (1985) | 40/80 | 7,76 ± 0,25 | 48,5 | | | |
| Guillon *et al.* (1986) | 110/220 | 7,78 ± 0,25 | 48,3 | | | |
| Koretz *et al.* (1989) | | | | | | |
| Femmes | 68/– | 7,69 ± 0,23 | 48,9 | | | |
| Hommes | 32/– | 7,78 ± 0,24 | 48,3 | | | |
| Dunne *et al.* (1992) | | | | | | |
| Femmes | 40/40 | 7,93 ± 0,20 | 48,0 | 6,53 ± 0,20 | –6,1 | 42,0 |
| Hommes | 40/40 | 8,08 ± 0,16 | 47,1 | 6,65 ± 0,16 | –6,0 | 41,2 |
| Patel *et al.* (1998) | 20/20 | 7,68 ± 0,40 | 49,0 | 5,81 ± 0,41 | –6,9 | 42,2 |
| Read *et al.* (2006) | 100/200 | 7,77 ± 0,2 | 48.4 | | | |
| Moyenne (non pondérée) | | 7,83 | 48,0 | 6,34 | –6,3 | |

D : dioptries; S : nombre de sujets; Y : nombre d'yeux.

métrie exprimée en dioptries de tenir compte de l'effet réducteur « moyen » de la face postérieure de la cornée, ce qui présente un intérêt pour certaines applications comme le calcul biométrique, du moins pour les yeux exempts d'antécédent de chirurgie cornéenne.

Réduire l'appréciation de la courbure cornéenne à une simple valeur kératométrique ne doit pas être effectué à distance du sommet de la cornée. Le contraire refléterait la perception erronée que le profil antérieur de la cornée épouse simplement celui d'une sphère ; cette approximation n'est en réalité valable que la zone des 3 mm centraux et pour des cornées saines et faiblement toriques. De plus, elle s'avère imprécise au décours de pathologies ou d'actes chirurgicaux ayant provoqué un remaniement important du profil cornéen antérieur.

### Asphéricité

Une surface optique est définie comme asphérique quand sa courbure varie du sommet vers la périphérie. Il existe une différence entre la courbure apicale et la courbure périphérique. De fait, une surface asphérique n'épouse pas la forme d'une sphère. La cornée humaine fournit un exemple approprié de surface asphérique. Elle possède deux surfaces convexes naturellement asphériques, c'est-à-dire qu'en dehors de la région située immédiatement à proximité de son sommet (dans les 3 mm centraux), elles ne correspondent pas à une surface sphérique. S'il en était ainsi, la représentation de la topographie cornéenne de nos patients pourvue d'une cornée de courbure en tout point constante serait uniformément monochrome !

Chacun des méridiens de la cornée asphérique présente une courbure qui varie du centre vers les bords. Cette variation de la courbure le long d'un méridien est explorée par la courbure instantanée (appelée encore courbure tangentielle, ou méridionale).

Les courbes mathématiques de la famille des sections coniques fournissent une bonne approximation du profil cornéen. Comme leur nom le suggère, elles sont engendrées par la section de la nappe d'un cône par un plan (Fig. 7.43). En fonction de l'angle de coupe, on obtient

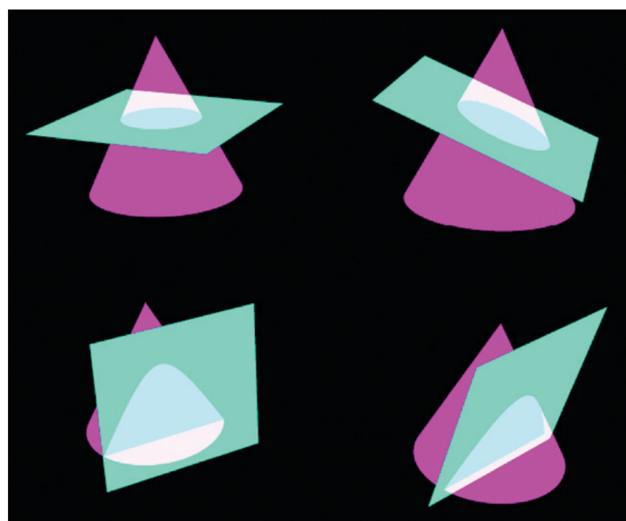


**Fig. 7.43.** *Origine des sections coniques, qui sont issues de l'intersection de la nappe d'un cône et d'un plan d'inclinaison variable.*
*A : cercle ; B : ellipse ; C : hyperbole ; D : parabole.*

un cercle, une ellipse, une parabole ou une hyperbole. Pour décrire analytiquement chacune de ces courbes, deux paramètres suffisent.

Pour représenter la réalité asphérique du profil d'une lentille ou d'une cornée, le choix s'est naturellement orienté vers une famille de figures simples appelées sections coniques car elles peuvent être engendrées comme leur nom l'indique par la section d'un simple cône par un plan de l'espace. L'ellipse, le cercle, la parabole et l'hyperbole sont les éléments constitutifs de cette famille de courbes et s'y distinguent par la valeur et/ou le signe de leur asphéricité. Fait remarquable, elles ont été découvertes par un savant grec, Appolonius, et cette découverte n'était mue que par pure curiosité intellectuelle car en dehors de tout contexte applicatif (bien avant que l'on découvre que ces courbes permettent de décrire le mouvement des planètes et de certaines comètes, la forme de certaines franges d'interférence lumineuse, certains états de polarisation de la lumière, etc.).

La famille des sections coniques comprend : les ellipses (oblate et prolate), le cercle, la parabole, et l'hyperbole. Elles possèdent toutes, sauf le cercle, une courbure variable. Deux paramètres suffisent à leur description : le rayon de courbure apical et le facteur d'asphéricité. Toutes les sections coniques possèdent ainsi une équation mathématique commune (équation de Baker) où figurent ces deux paramètres [17] :

$$y^2 = 2R_o x - (1-Q)x^2$$

$R_0$ correspond au rayon de courbure à l'apex de la conique : c'est le rayon de courbure du cercle tangent au sommet de la conique, également cercle osculateur. La variable d'asphéricité est communément désignée par la lettre « Q ». Ce paramètre découle des propriétés géométriques des courbes asphériques comme l'ellipse (Fig. 7.44). Son signe détermine la façon dont la dont la courbure apicale varie vers la périphérie : négatif, il traduit la réduction de la courbure du centre vers la périphérie (augmentation du rayon de courbure local), on parle alors d'asphéricité de type prolate. Quand Q a une valeur positive, la courbure augmente du centre vers la périphérie : l'asphéricité est de type oblate. Dans les deux cas, la valeur absolue de Q est proportionnelle au différentiel de courbure entre centre et périphérie (Fig. 7.45).

La valeur de Q détermine le type de la section conique :

- $Q < -1$ : la courbe est une hyperbole ;
- $Q = -1$ : la courbe est une parabole ;
- $-1 < Q < 0$ : la courbe est une ellipse prolate ;
- $Q = 0$ : la courbe est un cercle ;
- $Q > 0$ : la courbe est une ellipse oblate.

D'autres descripteurs de l'asphéricité, dénommés p, e, sont retrouvés dans la littérature. Ils peuvent tous être calculés à partir de l'un d'entre eux car $Q = p - 1$ et $p = 1 - e^2$.

Pour les ajuster à un méridien cornéen, on peut choisir ces paramètres comme le rayon de courbure apical et un paramètre décrivant le degré d'asphéricité. Le rayon de courbure apical s'ajuste à la courbure au sommet, et le paramètre d'asphéricité est celui qui permet d'épouser

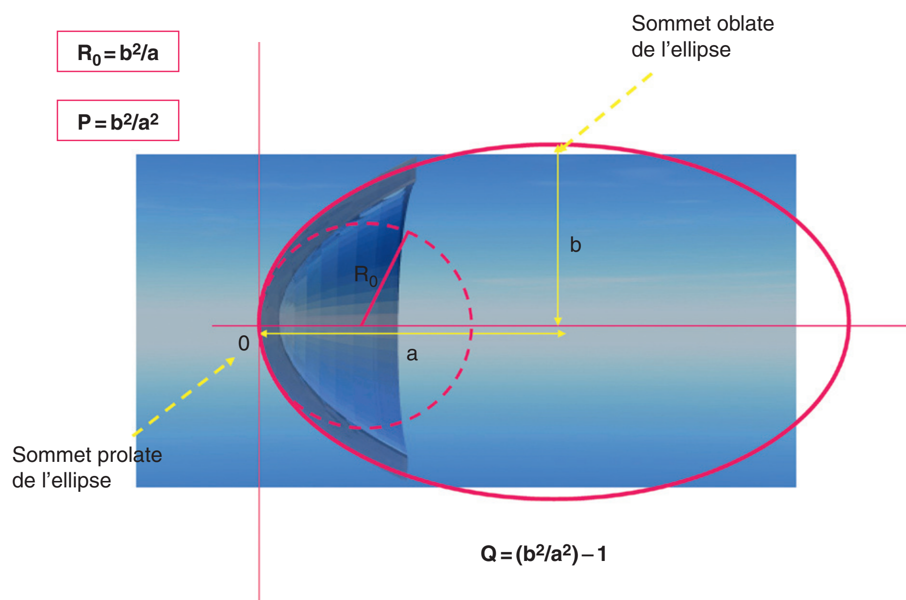



**Fig. 7.44. Sommets prolate et oblate d'une ellipse, et définition géométrique des descripteurs d'asphéricité.**
*$R_0$ est le rayon du cercle osculateur au sommet de l'ellipse. Le profil cornéen s'apparente en général au sommet prolate d'une ellipse.*

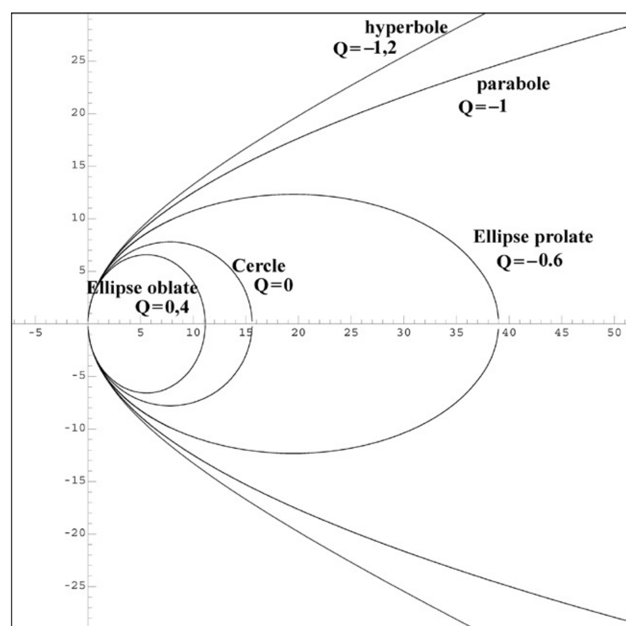



**Fig. 7.45. Sections coniques de même rayon apical, et d'asphéricité (Q) différente.**

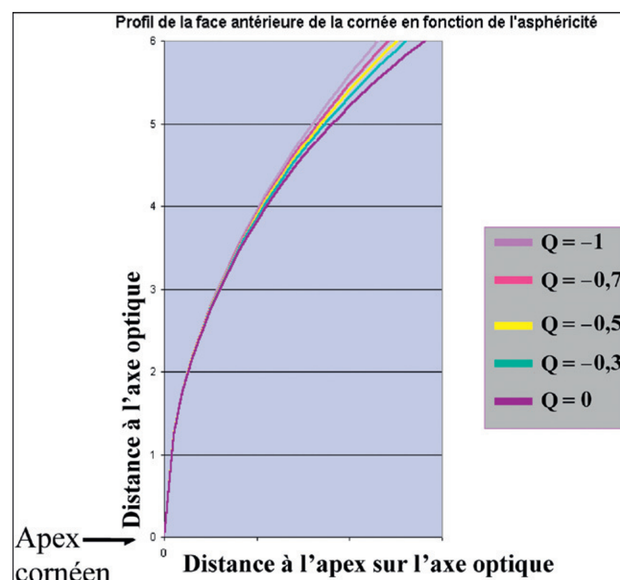



**Fig. 7.46. Représentation à l'échelle de profils d'une surface optique possédant la même courbure apicale (puissance paraxiale), mais différentes asphéricités, du cercle (Q = 0) à la parabole (Q = –1).**
*Ces profils sont pratiquement confondus dans la région paraxiale, où la réfraction d'un rayon lumineux serait peu différente quelle que soit l'asphéricité. En revanche, au-delà de la région paraxiale, la différence d'asphéricité entre les profils s'exprime en termes de variations de courbure (gradients de courbure différents) et donc de pouvoir réfractif local.*

la variation périphérique de la courbure cornéenne. Il s'agit donc d'un modèle à la fois simple, et « intelligible » sur le plan clinique [18–22], qui peut être utilisé pour décrire globalement la courbe asphérique formée par un méridien antérieur ou postérieur de la cornée.

La valeur moyenne du facteur d'asphéricité Q de la cornée antérieure est proche de –0,2 [15–16, 20–26]. Le profil moyen d'une section cornéenne peut être approximé par celui d'une ellipse prolate (facteur Q compris entre 0 et -1) et par assimilation, la cornée est alors qualifiée de prolate. Le rayon de courbure local augmente à mesure que l'on s'éloigne de l'apex cornéen (aplatissement périphérique). La Fig. 7.46 représente à l'échelle différents profils prolates, qui partagent la même courbure apicale et ne diffèrent que par la valeur de leur asphéricité.

Le Tab. 7.2 indique les différentes valeurs retrouvées dans la littérature pour le facteur d'asphéricité.

Il existe cependant une grande variabilité interindividuelle pour les caractéristiques topographiques de la cornée, et l'asphéricité qui est souvent rapportée par les logiciels des topographes comme une valeur « moyenne » varie en fait selon les méridiens de la cornée. La valeur de l'asphéricité des méridiens principaux peut également être rapportée (Fig. 7.47).

La recherche d'un lien éventuel entre asphéricité cornéenne antérieure et amétropie a fait l'objet de plusieurs publications dont les résultats sont contradictoires : absence de corrélation pour certains [16, 19], alors que Carney *et al.* ont récemment mis en évidence une tendance au moindre aplatissement périphérique de la cornée chez les myopes (Q se rapprochant de 0) [21]. Nous n'avons pas retrouvé de différence d'asphéricité cornéenne entre sujets myopes et emmétropes [21]. Nous avons récemment mesuré l'asphéricité cornéenne après simple désépithélialisation chez des sujets opérés de photokératectomie réfractive et retrouvé une asphéricité en moyenne plus prolate au niveau la couche de Bowman [25].

Une conséquence plus fonctionnelle de l'asphéricité prolate est de permettre la réduction des aberrations de sphéricité — ou aberrations sphériques (Fig. 7.48). On rencontre malheureusement parfois une certaine confusion entre asphéricité et aberration sphérique. L'aberration sphérique cornéenne reflète la variation entre la puissance centrale (paraxiale : proche de l'axe optique) et la puissance périphérique (non paraxiale, à distance de l'axe optique) de la cornée. Une lentille sphérique (dont les deux faces ont un profil circulaire) présente un pouvoir de réfringence plus grand à sa périphérie qu'au centre, et les rayons réfractés en périphérie sont donc plus rapidement focalisés. Le retentissement des aberrations de sphéricité partiellement compensées par l'asphéricité cornéenne sur la qualité de vision est donc d'autant plus important que le diamètre de la pupille d'entrée est grand (laissant passer plus de rayons périphériques).

Tableau 7.2
Asphéricité de la face antérieure de la cornée

| | S/Y | Q | Écart-type |
|---|---|---|---|
| Mandell et St Helen (1971) | 8/8 | –0,23 | –0,04 à 0,72 |
| Kiely *et al.* (1982) | 88/176 | –0,26 | 0,18 |
| Edmund et Sjontorft (1985) | 40/80 | –0,28 | 0,13 |
| Guillon *et al.* (1986) | 110/220 | –0,18 | 0,15 |
| Patel *et al.* (1993) | 20/20 | –0,01 | 0,25 |
| Lam et Douthwaite (1997) | 60/60 | –0,30 | 0,13 |
| Read *et al.* (2006) | 100/200 | –0,19 | 0,1 |

L'aplatissement cornéen périphérique (profil prolate, réduction du rayon de courbure en périphérie) explique en partie que le rayon de courbure d'une lentille de contact ne soit pas exactement égal à celui mesuré à proximité du centre de la cornée au moyen d'un kératomètre. Dans certaines circonstances cliniques (après chirurgie réfractive, greffe, etc.), le caractère fortement asphérique des cornées impose des règles d'adaptation particulières.

L'asphéricité cornéenne postérieure est physiologiquement plus négative (plus prolate) que l'asphéricité cornéenne antérieure [14, 27, 28]. La face postérieure est plus cambrée en son sommet (courbure apicale accentuée), et ces caractéristiques expliquent qu'en topographie d'élévation, l'élévation cornéenne postérieure vis-à-vis de sa sphère de référence est en moyenne supérieure à celle de la surface antérieure de la cornée. Autrement dit, la surface cornéenne postérieure est simplement « plus éloignée » de celui de la sphère de référence, que le profil antérieur. Cette dissociation topographique s'accentue au cours de l'évolution du kératocône : dans ses formes évoluées, cette pathologie s'accompagne d'une exagération du caractère prolate de l'asphéricité cornéenne [28].

L'asphéricité cornéenne antérieure est retrouvée inversée dans une grande majorité de cas après chirurgie réfractive cornéenne démyopisante et greffe de cornée : de prolate (Q <0), elle devient oblate (Q >0) [26] (Fig. 7.49). À l'inverse, une asphéricité hyperprolate est généralement mesurée après chirurgie cornéenne de l'hypermétropie (Lasik).

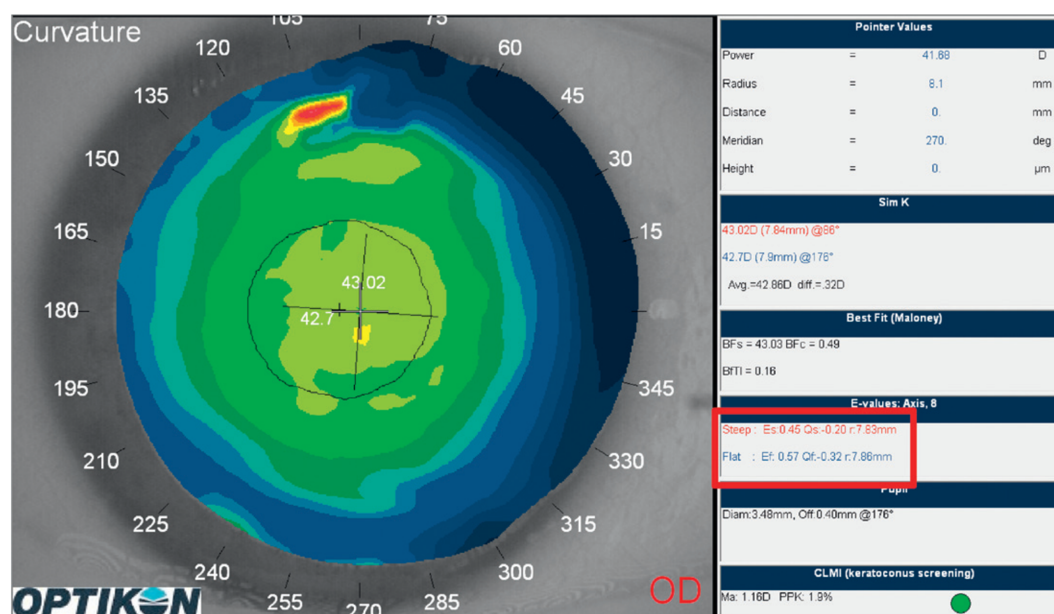



***Fig. 7.47. Topographie spéculaire en mode axial postopératoire d'une cornée opérée de Lasik pour myopie.***
*Noter l'augmentation de la courbure du centre vers les bords, qui est représentée en coupe en bas (méridien vertical). La valeur moyenne de l'asphéricité des méridiens cornéens dans les 6 mm centraux est 0,25.*

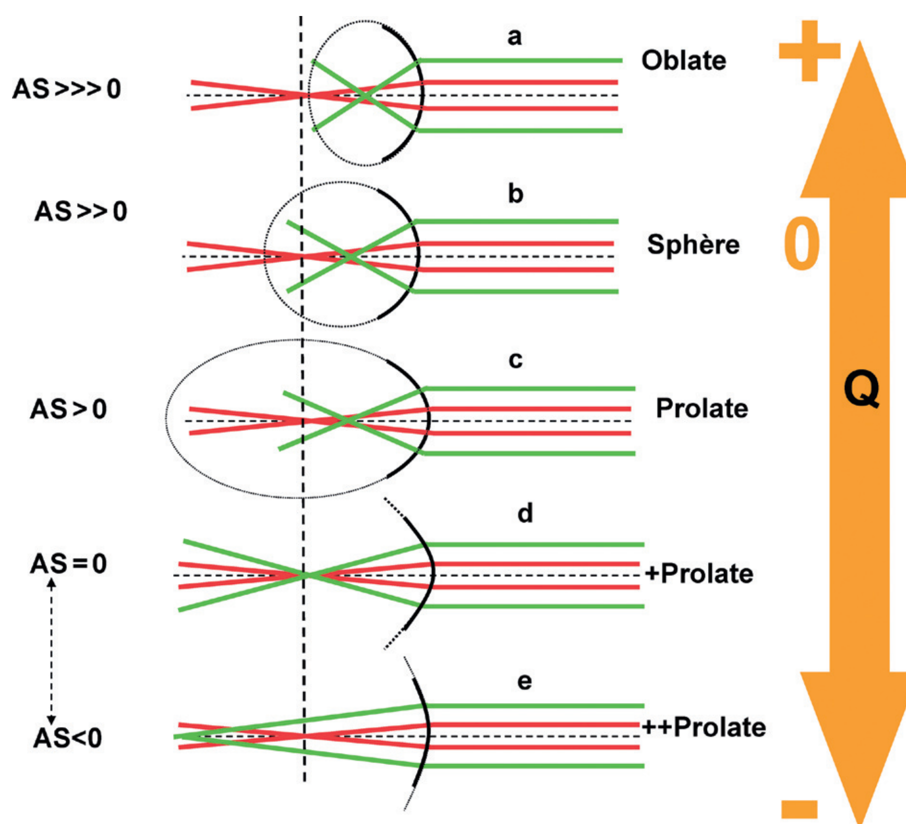



***Fig. 7.48.*** ***Représentation schématique des variations de l'aberration sphérique pour des surfaces courbes d'asphéricité Q variable séparant deux milieux d'indices différents et homogènes (l'indice de réfraction du dioptre a la valeur la plus élevée).***
*Pour une meilleure visualisation, le contour des surfaces est prolongé en pointillés. Les rayons paraxiaux sont représentés en rouge, les rayons marginaux en vert. Toutes les surfaces ont la même courbure paraxiale et donc la même puissance apicale (les rayons paraxiaux convergent de la même façon pour chacune des surfaces) et diffèrent par leur type d'asphéricité (valeur et signe de Q) : oblate (a), sphérique (b) ; prolate (c), parabolique (d) et hyperbolique (e). L'aberration sphérique (AS) est positive et décroît en a, b, c, nulle en d, négative en e. La valeur d'asphéricité qui permet d'annuler l'aberration sphérique (en d) dépend de la valeur des indices de réfraction.*

L'étude de la face postérieure de la cornée est plus difficile car elle doit s'effectuer au travers de la face antérieure et du stroma cornéen. Les caractéristiques de la face postérieure de la cornée ont d'abord été estimées par des modèles mathématiques fondés sur la connaissance de la courbure de la face antérieure de la cornée et de la pachymétrie en certains points. Patel *et al.* ont ainsi estimé le rayon de courbure postérieur apical moyen à 5,8 mm, et l'asphéricité cornéenne postérieure moyenne à -0,42 (prolate) ; l'asphéricité cornéenne antérieure utilisée pour ce calcul était quasi sphérique (–0,01) [29]. Le choix d'asphéricités antérieures différentes a conduit d'autres auteurs à proposer des valeurs plus prolates pour la face postérieure ; il est évident que les procédures de *ray-tracing* effectuées pour le calcul du rayon de courbure et de l'asphéricité cornéenne postérieure supposent un index cornéen unique, et que toute imprécision de mesure au niveau de la face antérieure de la cornée est reportée au niveau de la face postérieure. Le rapport moyen entre les rayons de courbure antérieure et postérieure a été estimé à 1,210 selon certaines études [9, 14]. L'assimilation de la cornée à une surface réfractive unique dans les modèles d'œil simplifiés suppose un rapport constant entre les courbures moyennes de la face antérieure et de la face postérieure de la cornée ; ceci explique la valeur généralement proche de 1,33 pour le choix d'un indice de réfraction « minoré » (ou kératométrique). Ce choix résulte en une réduction systématique d'environ 10 % par rapport à la puissance cornéenne antérieure « vraie ».

Le rapport de courbure moyen est modifié après remodelage cornéen antérieur chirurgical (ex : Lasik), et l'utilisation de l'indice kératométrique aboutit à une réduction moindre de la puissance cornéenne antérieure vraie (celle-ci ayant diminué grâce au Lasik myopique, alors que la face postérieure demeure inchangée). Ceci explique en partie l'imprécision constatée pour les calculs biométriques de la puissance de l'implant pour la chirurgie de la cataracte chez les patients opérés de chirurgie réfractive cornéenne.

### *Toricité*

En topographie cornéenne, la toricité cornéenne antérieure se réfère principalement à l'existence d'une variation de la courbure entre les méridiens. Elle est dite régulière (hémiméridiens les plus cambrés et les plus plats respectivement alignés et perpendiculaires entre eux) ou irrégulière quand ces deux conditions ne sont pas satisfaites (kératocône, cicatrice, etc.).

La toricité de la région apicale de la cornée caractérise l'absence de symétrie de révolution, la courbure des méridiens principaux varie entre deux valeurs : l'une minimale (méridien le moins cambré), l'autre maximale (méridien le plus cambré) (Fig. 7.50). En cas de toricité régulière, ces méridiens sont perpendiculaires (ex : 0°/90°). Une différence de quelques centièmes de millimètres pour le rayon de courbure apical est pourvoyeuse d'astigmatisme réfractif, car la puissance réfractive apicale des méridiens analysés varie de concert avec

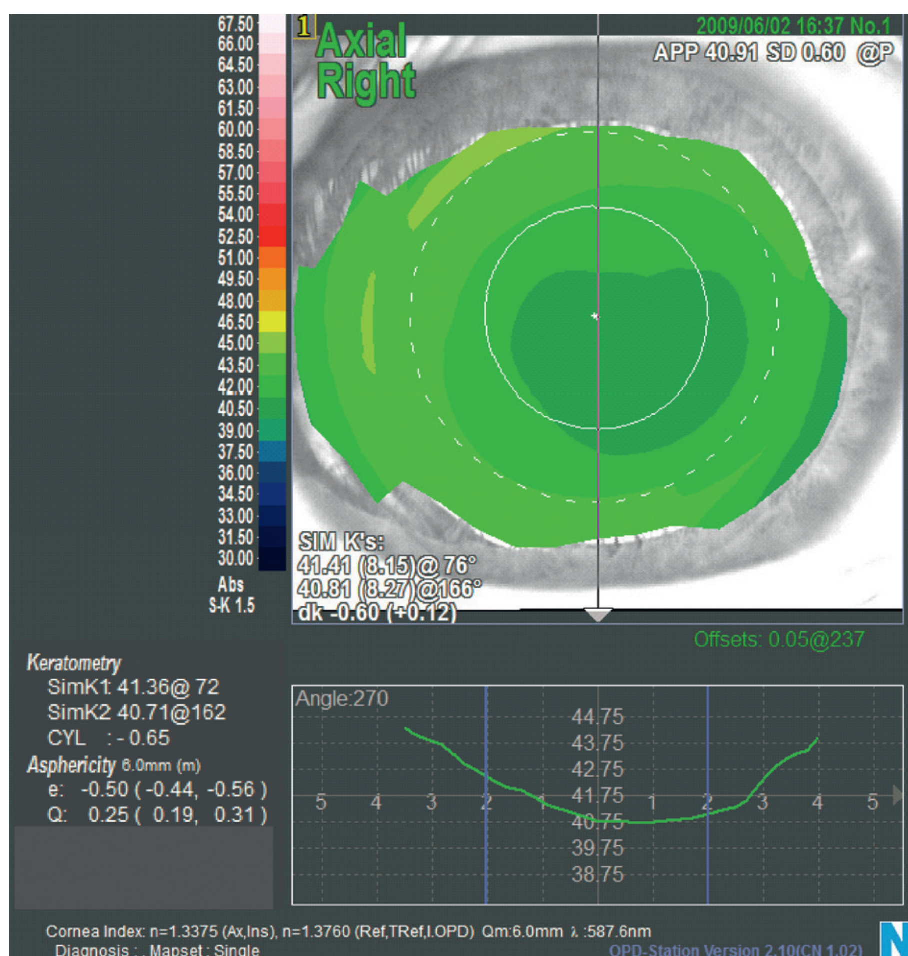



***Fig. 7.49.*** ***Exemple de calcul de l'excentricité et de l'asphéricité (Q) pour les méridiens principaux (*****steep/flat*****) de la face antérieure de la cornée par un logiciel topographique.***

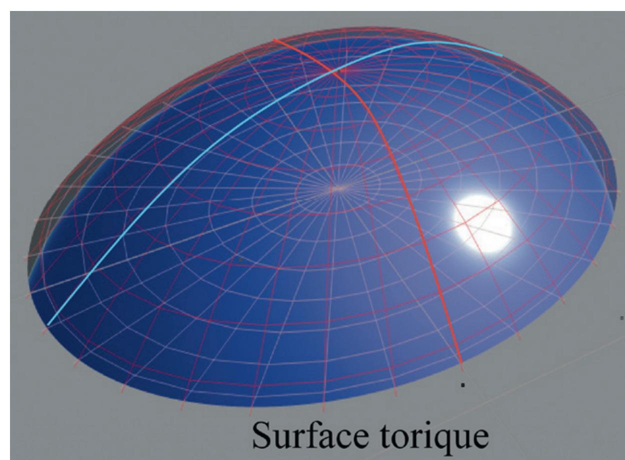



***Fig. 7.50. Une surface sphérique présente une courbure identique en chaque point, quel que soit le méridien considéré.*** *Une surface torique présente une variation de courbure apicale (apex : A) entre les différents méridiens. En chaque point de ce type de surface (pas seulement l'apex), il existe une infinité de courbures selon la direction considérée. Ces courbures varient entre deux extrêmes. Pour le sommet de cette surface (apex), ces deux extrêmes correspondent aux courbures respectives du méridien le plus plat et du méridien le plus cambré.*

leur courbure. Il existe une toricité régulière cornéenne physiologique; le plus souvent, le rayon de courbure cornéen vertical est légèrement inférieur au rayon de courbure cornéen horizontal (toricité conforme).

En cas d'astigmatisme cornéen congénital marqué, les deux faces cornéennes (antérieures et postérieures) sont toriques (l'appréciation de la toricité postérieure s'effectue par topographie à balayage par fente ou par caméra rotative de type Scheimpflug, toute mesure spéculaire étant impossible).

Quand la toricité cornéenne est excessive, ou d'axe non conforme, ou encore non compensée par les autres dioptres oculaires, elle engendre un astigmatisme réfractif, qui correspond à la résultante de l'astigmatisme d'origine cornéenne et l'astigmatisme issu des autres dioptres oculaires (cristallinien pour l'essentiel).

La toricité cornéenne est à l'origine de l'astigmatisme cornéen.

La courbure de la surface cornéenne varie donc :

- le long d'un hémiméridien (asphéricité cornéenne);
- entre les méridiens apicaux (toricité cornéenne).

La conjugaison de la toricité et de l'asphéricité cornéenne antérieure induit un aspect en «sablier» ou «nœud papillon» au niveau de la topographie spéculaire antérieure [2–5] (Fig. 7.51). Ce sablier est de couleurs chaudes pour les cornées prolates, et froides pour les cornées oblates.

L'utilisation d'une surface biconique permet de modéliser une cornée torique et asphérique (Fig. 7.52). Elle

se construit à partir des valeurs des rayons de courbure apicaux et des asphéricités respectives des deux méridiens principaux pour la surface considérée.

L'ellipsoïde torique est un modèle couramment utilisé pour modéliser une cornée asphérique et torique, et peut être vu comme une sphère ayant subi une élongation et/ou une compression le long de deux de ses méridiens principaux (Fig. 7.53). En chaque point des surfaces de ce type, les rayons de courbure principaux correspondent aux rayons tangentiel et sagittal pris en compte dans les algorithmes de topographie spéculaire. Le rayon de courbure tangentiel en un point de cette surface correspond au rayon de courbure mesuré dans la direction du méridien passant par ce point. Le rayon de courbure sagittal (ou axial) est perpendiculaire à celui-ci, et son centre situé sur l'axe de révolution de la surface. Le rayon tangentiel n'est égal au rayon axial qu'au sommet d'un ellipsoïde de révolution (le sommet de l'ellipsoïde de révolution est le seul point où la courbure est constante quelle que soit la direction de mesure). Tous les points situés à une distance identique du sommet ont un même rayon de courbure sagittal et un même rayon de courbure tangentiel.

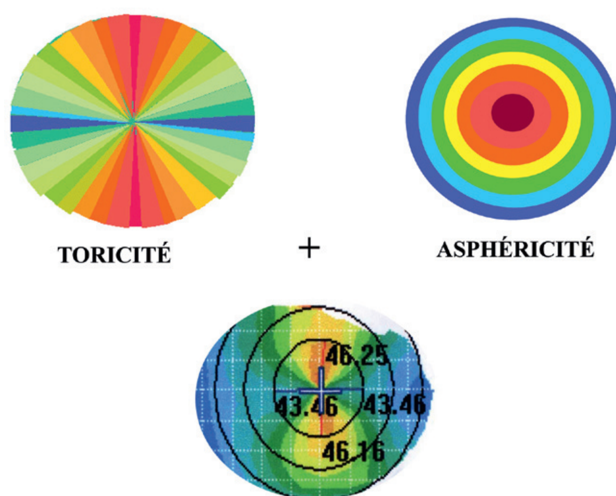



**Fig. 7.51.** *Les propriétés combinées de toricité et d'asphéricité expliquent l'aspect en «sablier» de la topographie cornéenne de courbure.*

### Asymétrie

En plus d'être plus ou moins toriques (variation de courbure entre les méridiens à l'apex) et asphériques (variation de la courbure le long des méridiens), les surfaces cornéennes sont également légèrement asymétriques. Cette asymétrie peut se caractériser par un axe particulier, et se distingue en cela de l'irrégularité, qui ne possède pas d'orientation propre. Cet axe délimite alors les hémiméridiens opposés dont la différence de courbure est la plus importante.

L'asymétrie peut être objectivée de façon qualitative par une distribution asymétrique des couleurs utilisées pour représenter les variations de courbure ou d'élévation. À elle seule, la présence d'une asymétrie marquée doit faire évoquer la présence d'une pathologie dégénérative de type kératocône ou dégénérescence pellucide marginale. De nombreux indices obtenus à partir d'informations de courbure peuvent être utilisés pour quantifier l'asymétrie. À partir des valeurs calculées pour ces indices, certains auteurs ont proposé une classification diagnostique des affections cornéennes [30, 31].

La modélisation de l'irrégularité cornéenne est généralement effectuée par une famille de surfaces aux propriétés particulières : les polynômes de Zernike. Ce sont des fonctions de deux variables ($x$ et $y$ en coordonnées cartésiennes, $\rho$ et $\theta$ en coordonnées polaires) définies sur le disque de rayon unité (la pupille est normalisée). Le système de coordonnées utilisé par convention pour la caractérisation de ces polynômes est représenté sur la Fig. 7.54. La combinaison linéaire de ces fonctions permet de modéliser un front d'onde ou la surface

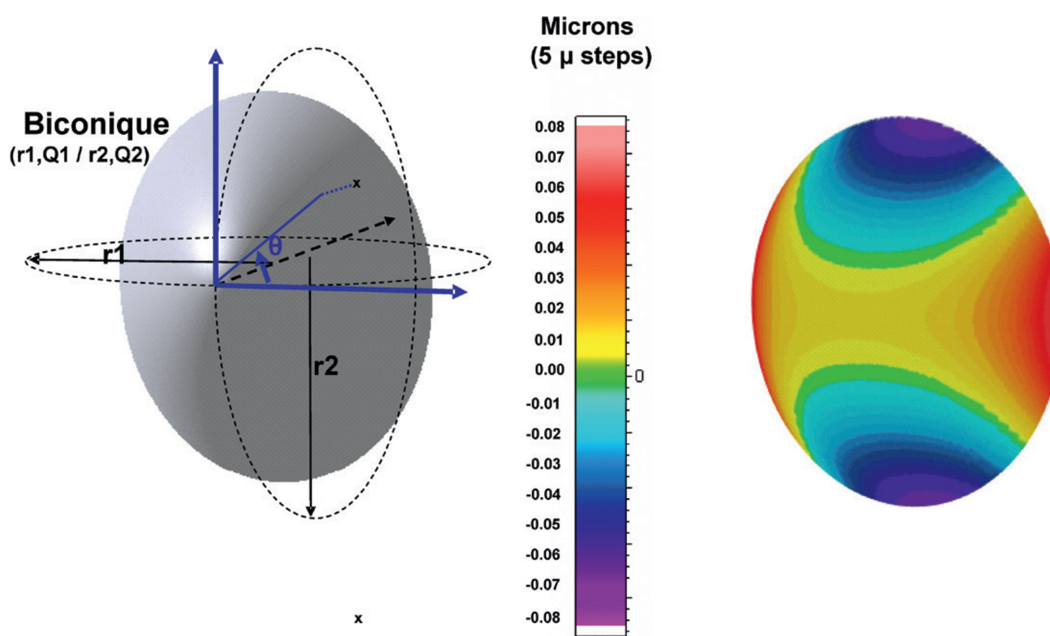



**Fig. 7.52.** *Représentation en élévation par rapport à une sphère de référence d'une surface cornéenne modelée par une surface «biconique».*
*Cette surface est engendrée par une interpolation entre deux sections coniques ($r_1$, $Q_1$ – $r_2$, $Q_2$). L'échelle de couleur varie par pas de 5 µm.*

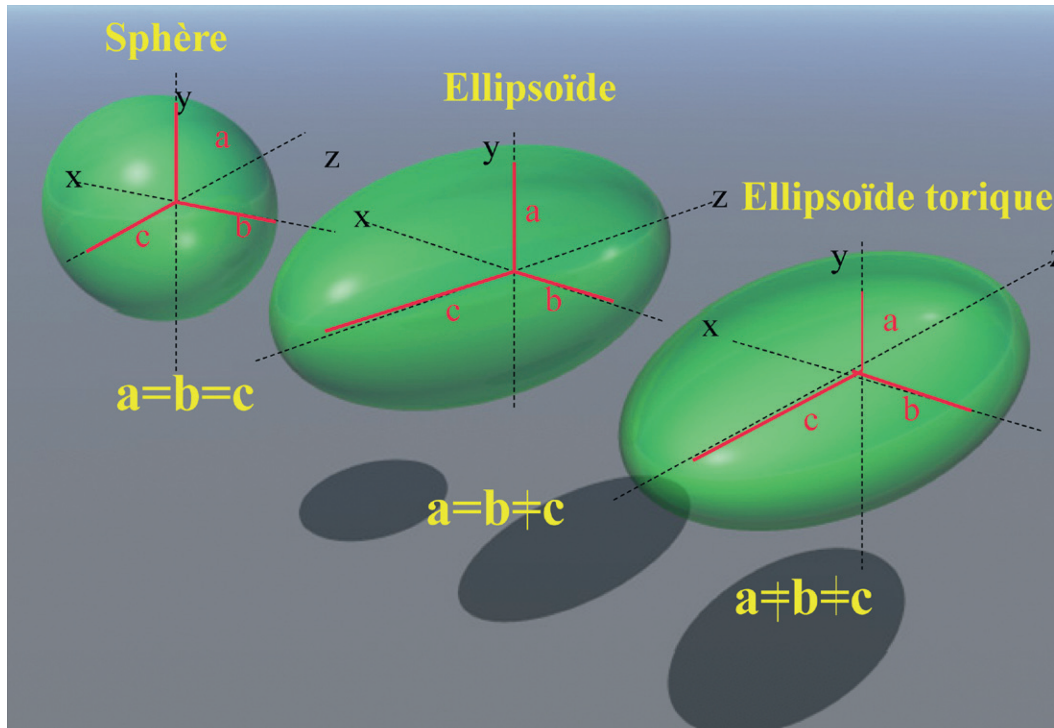



**Fig. 7.53.** *Exemple de surfaces tridimensionnelles utilisées en modélisation cornéenne.*

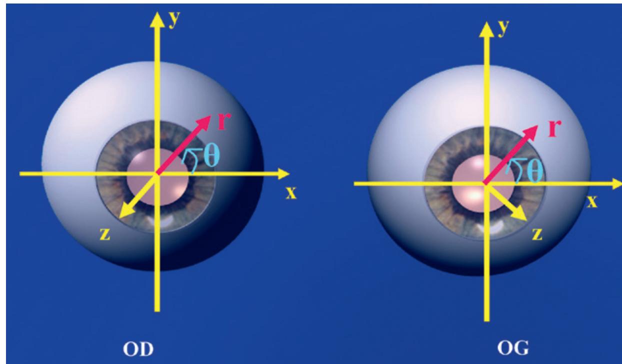



**Fig. 7.54.** ***Système de coordonnées utilisé pour la représentation par les polynômes de Zernike.***
*Par convention, il est identique pour les deux yeux. Il est centré sur le centre de la pupille. L'axe des abscisses horizontal est dirigé vers la droite, l'axe des ordonnées vertical est orienté vers le haut. L'axe d'élévation Z est dirigé vers l'extérieur de l'œil. Dans ce repère cartésien : x = r sinθ, et y = r cosθ, r = ($x_2$ + $y_2$)/2.*

cornéenne [32] : chaque fonction est multipliée par un coefficient (dit coefficient de Zernike) puis les résultats additionnés. Cette démarche est analogue à la décomposition en série de Fourrier d'une fonction.

Chaque polynôme de Zernike noté $Z_n^m$ correspond au produit entre un polynôme de degré n et une fonction trigonométrique de fréquence azimutale m (Fig. 7.55) :

(1)

$$Z_n^m(\rho,\theta) = \begin{cases} \sqrt{2(n+1)}R_n^{|m|}(\rho)\cos|m|\theta & si \quad m>0 \\ \sqrt{2(n+1)}R_n^{|m|}(\rho)\sin|m|\theta & si \quad m<0 \\ \sqrt{(n+1)}R_n^{0}(\rho) & si \quad m=0 \end{cases}$$

(2)

$$\text{avec } R_n^{|m|}(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-|m|)/2} \frac{(-1)^s(n-s)!}{s!\left[\frac{(n+m)}{2}-s\right]!\left[\frac{(n-m)}{2}-s\right]!}\rho^{n-2s}$$

L'équation générale d'un polynôme de Zernike est donc le produit entre un facteur de normalisation, un polynôme de degré n, et une fonction trigonométrique de fréquence m.

(3)

$$Z_n^m = \overbrace{\sqrt{2(n+1)}}^{facteur\ de\ normalisation} \quad \overbrace{R_n^m(\rho)}^{polynôme} \quad \overbrace{\cos m\theta}^{fonction\ trigonométrique}$$

La structure tridimensionnelle d'un polynôme dépend des valeurs de n et m ; n est un entier toujours positif. Pour chaque valeur de n, il existe des valeurs possibles pour m variant entre –n et + n par pas de 2. Par exemple, si n = 4, m prend les valeurs suivantes : –4, –2, 0, 2 et 4. Ainsi, pour un ordre radial n donné, il existe (n +1) polynômes de cet ordre qui diffèrent par la valeur de leur fréquence m.

Le facteur de normalisation permet à la variance du polynôme d'être égale à 1 (la somme des carrés des écarts à la moyenne de l'élévation de chacun des points du polynôme est égale à 1).

### *Propriétés de la décomposition d'une surface en polynômes de Zernike*

Une surface de pourtour sphérique peut donc être décomposée en une combinaison linéaire de polynômes de Zernike $Z_n^m$ affectés d'un coefficient particulier $c_n^m$ :

(4)

$$Surface = \sum_{\substack{n=0 \\ -m}}^{\substack{+m \\ n}} c_n^m Z_n^m = c_0^0 Z_0^0 + c_1^{-1}Z_1^{-1} + c_1^1 Z_1^1 + c_2^{-2}Z_2^{-2} + \ldots + c_n^m Z_n^m$$

Ces fonctions polynomiales sont orthogonales, ce qui signifie en pratique qu'il n'existe qu'une seule décomposition possible pour une surface cornéenne donnée

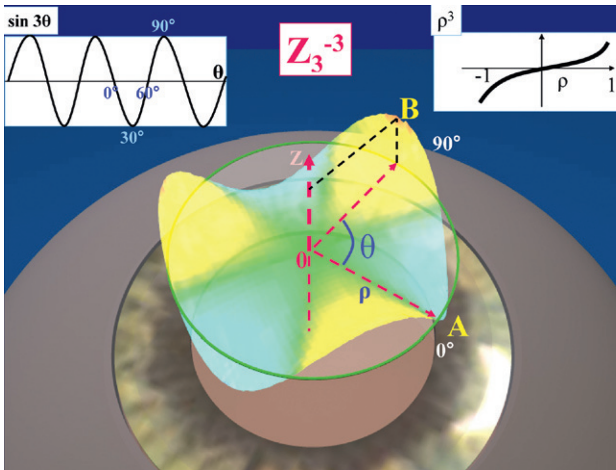



**Fig. 7.55. Représentation schématique du polynôme de Zernike (hors facteur de normalisation) correspondant à l'astigmatisme triangulaire (trefoil) $Z_3^{-3}$ sur le disque pupillaire normalisé (rayon égal à 1) matérialisé sur cette figure par un contour vert.**

*Il est égal au produit d'une fonction polynomiale du rayon de degré 3 ($\rho_3$) où ρ représente la distance du point considéré au centre, et d'une fonction trigonométrique de fréquence azimutale égale à 3 (sin3 ?), où θ correspond à l'angle fait avec l'horizontale du méridien où est situé le point considéré. La forme globale du polynôme est dictée par ces deux fonctions. Le profil d'une section de ce polynôme le long d'un méridien quelconque correspond à celui de la fonction cubique. L'amplitude de celle-ci est modulée par la valeur de sin (3 θ).Quand θ = 0°, 60°, 120°,… sin 3 θ = 0 : tous les points situés sur ces méridiens ont donc une élévation z nulle (exemple : le point A, situé à l'extrémité du rayon unité en regard du méridien à 0° : $\rho_A$ = 1, $\theta_A$ = 0°). Inversement, les amplitudes maximales de variation pour z seront atteintes pour les méridiens situés à θ = 30°, 90°, 150°… (sin 3 θ = 1 ou –1 pour ces valeurs). Le point B, situé à l'extrémité du rayon unité ($\rho_B$ = 1) en regard du méridien situé à 90° ($\theta_B$ = 90°) possède ainsi une élévation positive maximale. L'élévation des points situés en regard du méridien situé à 90°/270° (sin 3 × 90° = sin3 × 270° = 1) est liée à la seule fonction cubique $\rho_3$.*

(de plus, l'ajout ou la soustraction d'un terme donné à la surface ne modifie pas la valeur des termes restants).

L'élévation des points situés à une distance radiaire ρ du centre de la cornée est représentée par une combinaison linéaire de fonctions trigonométriques de fréquences variables. Chacune de ces fonctions est affectée d'une constante égale au produit entre le coefficient du polynôme de Zernike $c_n^m$ et la valeur (fonction de ρ) du polynôme $R_n^m$ (ρ). La décomposition du front d'onde ou de la surface cornéenne en polynômes de Zernike s'apparente ainsi aux principes qui régissent la décomposition en séries de Fourier.

La modélisation de la surface cornéenne par les polynômes de Zernike permet de calculer rapidement l'effet imprimé sur le front d'onde lumineux (aberrations induites par la surface cornéenne considérée), à condition de connaître (ou prédire avec précision) un front d'onde sphérique engendré par une surface cornéenne de référence conférant à la cornée un pouvoir optique « idéal ».

Ainsi, toute surface de pourtour circulaire peut être décomposée en une combinaison de surfaces élémentaires représentées par les différents polynômes de Zernike, et affectés d'un coefficient dont la valeur absolue reflète « le poids » de chaque surface élémentaire présente dans la décomposition. La morphologie tridimensionnelle des premiers polynômes de Zernike permet de désigner des formes simples pour caractériser certaines aberrations optiques, ou particularités géométriques de la surface cornéenne.

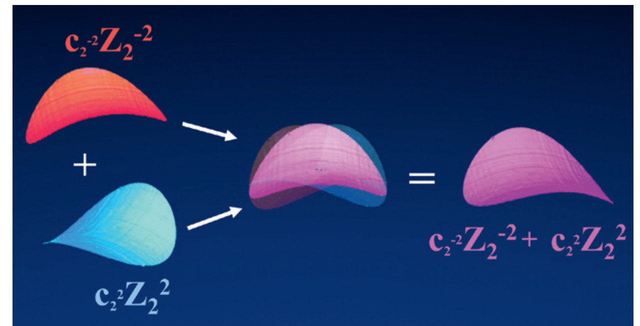



**Fig. 7.56. L'astigmatisme est exprimé comme une combinaison linéaire des polynômes $Z_2^{-2}$ et $Z_2^2$, dont la résultante est une aberration également en forme de selle (représentée ici en mauve).**

*L'orientation de ces polynômes est fixe (verticale pour $Z_2^2$, oblique pour $Z_2^{-2}$). Les valeurs respectives des coefficients $c_2^{-2}$ et $c_2^2$ déterminent la magnitude et l'orientation de l'astigmatisme exprimé par cette combinaison. En cas d'astigmatisme conforme ou non conforme d'axe vertical (90°), la valeur du coefficient $c_2^{-2}$ est nulle (l'orientation de $Z_2^2$ est verticale et suffit à la caractérisation de ce type d'astigmatisme).*

En effet, les premiers modes peuvent être relié aux principales aberrations optiques : $Z_1^1$ et $Z_1^{-1}$ correspondent au tilt, $Z_0^2$ au défocus, $Z_2^2$ et $Z_2^{-2}$ à l'astigmatisme, etc.

Les polynômes $Z_n^0$ (m = 0) sont invariants par rotation (symétrie de révolution : leurs expressions ne dépendent que de ρ). Les autres polynômes présentent un nombre d'axes de symétrie égal à m et sont présents en deux « exemplaires » orientés l'un par rapport à l'autre selon un angle égal à 90° divisé par m. Par exemple, $Z_2^2$ et $Z_2^{-2}$ (astigmatisme de degré 2) présentent deux axes de symétrie et sont tournés l'un par rapport à l'autre de 45°. Cette propriété de symétrie permet de reproduire, par combinaison linéaire des deux polynômes $Z_2^2$ et $Z_2^{-2}$, un astigmatisme de n'importe quelle magnitude et orienté selon n'importe quel axe (Fig. 7.56). L'astigmatisme exprimé par ces polynômes correspond à une puissance cylindrique jacksonienne (le déphasage est mesuré par rapport au défocus moyen : analogie avec l'expression sphérocylindrique en cylindres croisés). Contrairement à la notation (Cylindre × Axe), où toute modification du cylindre entraîne une modification de l'équivalent sphérique, l'utilisation des polynômes de Zernike effectue une distinction implicite entre les composantes sphériques et purement cylindriques de l'amétropie cylindrique.

### Coefficient RMS

Le coefficient *Root Mean Square* est calculé sur une pupille normalisée (rayon égal à l'unité). Il représente le « poids » du polynôme considéré. Il s'exprime en microns.

Pour la surface cornéenne analysée, la valeur des coefficients RMS de chacun des polynômes de Zernike dépend :

– du diamètre cornéen analysé ;

– de la surface ou plan de référence éventuel par rapport à laquelle la décomposition en polynômes de Zernike est effectuée.

La Fig. 7.57 représente une décomposition en polynômes de Zernike d'une surface cornéenne antérieure représentée par rapport à un ellipsoïde de référence.

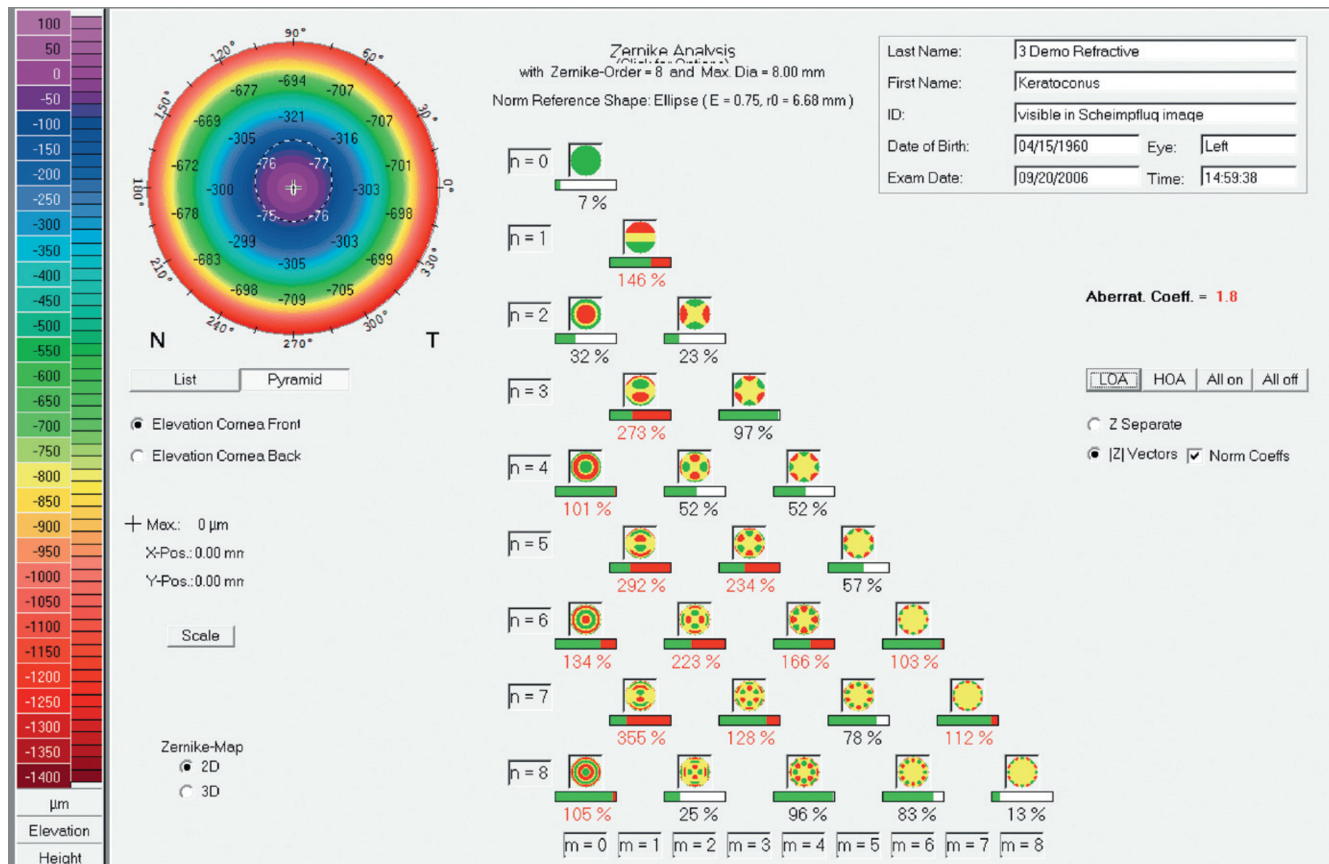



**Fig. 7.57.** *Représentation de l'élévation cornéenne sur un diamètre de 8 mm et relative à un ellipsoïde de référence par une décomposition en polynômes de Zernike (topographe Pentacam).*

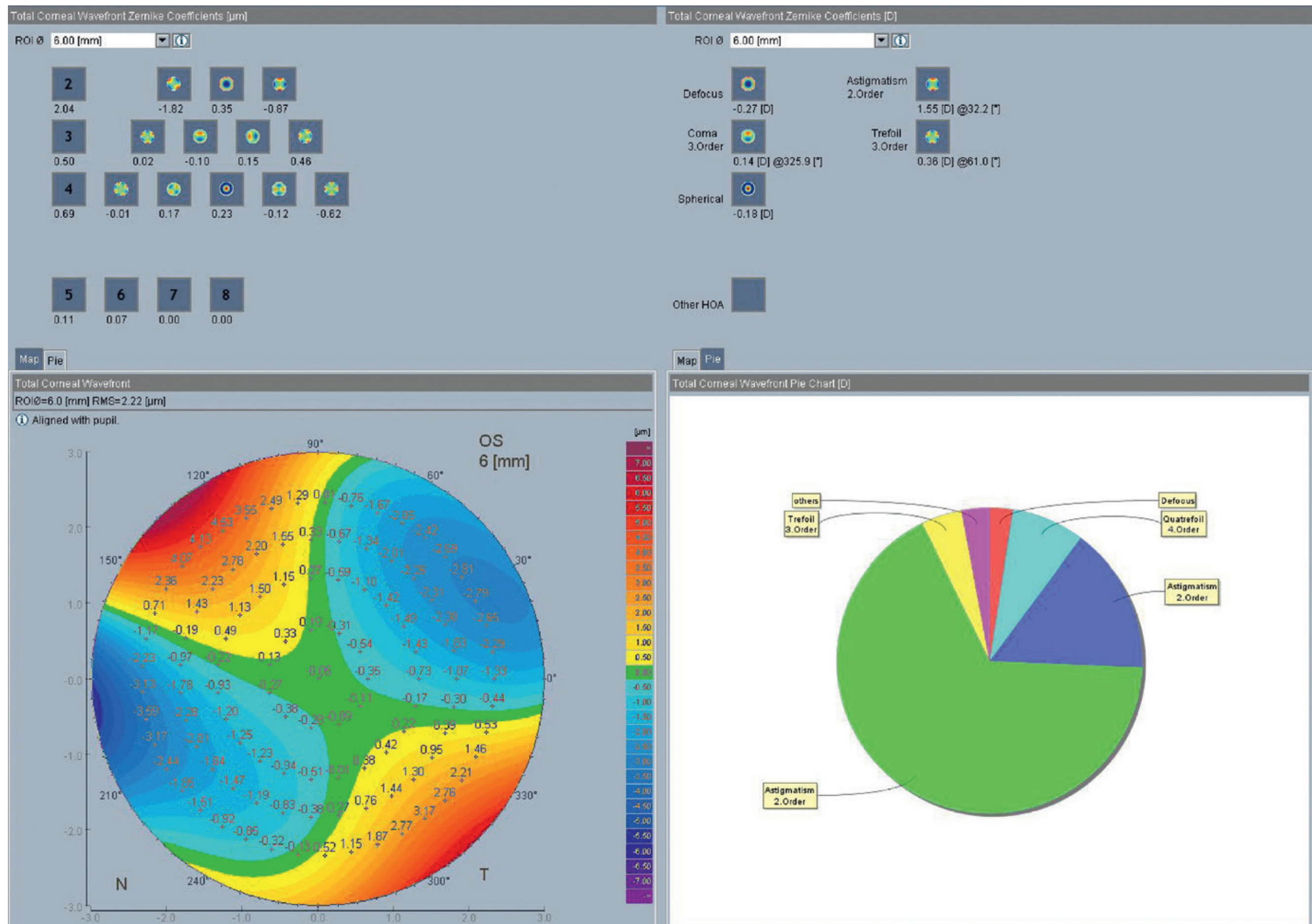



**Fig. 7.58.** *Calcul et représentation du front d'onde cornéen total sur une pupille de 6 mm.*

La différence entre la surface parfaitement régulière de l'ellipsoïde et la cornée mesurée est décomposée en une somme de termes de Zernike. La valeur de chacun des coefficients de Zernike est rapportée en pourcentage vis-à-vis d'une cornée normale de référence.

Le calcul du front d'onde cornéen (*corneal wavefront*) dépend lui d'assomptions relatives à un front d'onde de référence, qui serait celui d'une cornée optiquement parfaite (n'induisant aucune aberration de haut degré) et d'un indice de réfraction « physique » du stroma cornéen. La Fig. 7.58 montre un exemple de calcul théorique des aberrations optiques induites par une surface cornéenne pour un diamètre pupillaire de 6 mm. La Fig. 7.59 montre la carte de puissance réfractive d'une cornée ayant été opérée par la technique de kératotomie radiaire (4 incisions) : le calcul du front d'onde cornéen met en évidence un taux élevé d'aberration de type tétrafoil : l'orientation de cette aberration est superposable à celle des incisions de kératotomie.

Les 28 premiers polynômes de Zernike sont représentés en échelle de gris sur la Fig. 7.60.

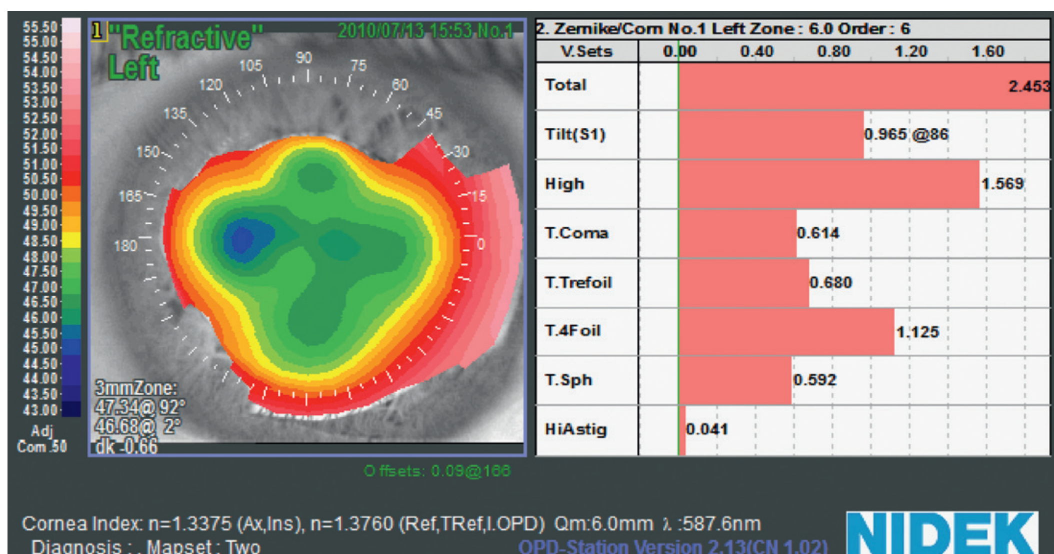



***Fig. 7.59.*** ***Zone centrale de moindre puissance au périmètre losangique (à gauche) révélée par la carte de puissance réfractive.*** *Cette conformation particulière, engendrée par la réalisation de 4 incisions de kératotomie radiaire, implique l'induction d'un taux élevé d'aberrations optiques de haut degré, dominées par le tétrafoil (T.4 foil).*

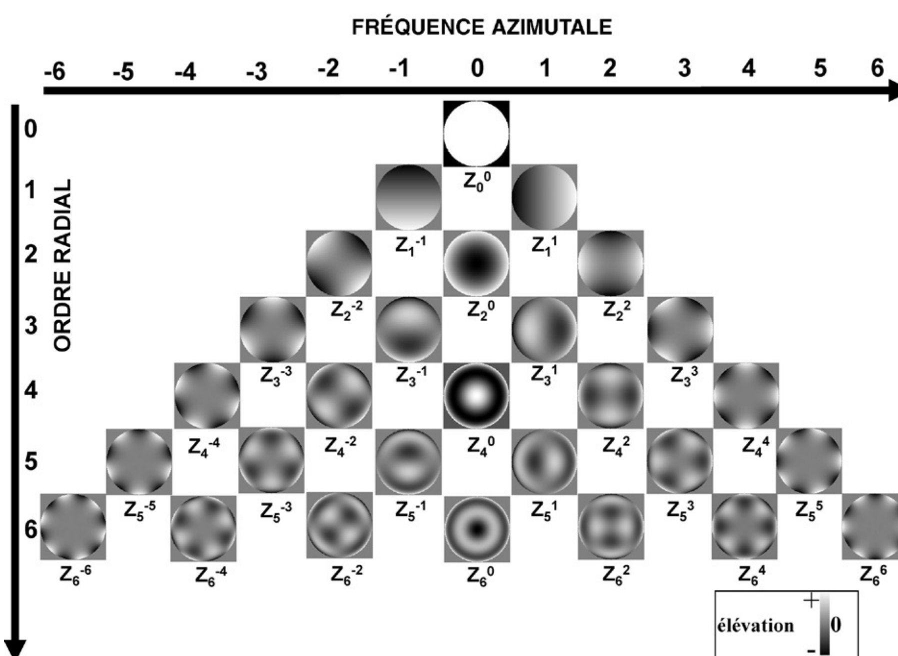



***Fig. 7.60.*** ***Représentation en échelle de gris correspondant à l'élévation verticale des 28 premiers polynômes de Zernike en fonction de leur fréquence azimutale et de leur ordre radial.***

Les équations en coordonnées polaires (sans les facteurs de normalisation) des 36 premiers polynômes de Zernike sont énumérées dans le Tab. 7.3.

Tableau 7.3
Équations en coordonnées polaires (sans les facteurs de normalisation) des 36 premiers polynômes de Zernike

| j = Index | n = Ordre | m = Fréquence | |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | –1 | $2 r \sin \theta$ |
| 2 | 1 | 1 | $2 r \cos \theta$ |
| 3 | 2 | –2 | $r^2 \sin 2 \theta$ |
| 4 | 2 | 0 | $(2r^2 - 1)$ |
| 5 | 2 | 2 | $r^2 \cos 2 \theta$ |
| 6 | 3 | –3 | $r^3 \sin 3 \theta$ |
| 7 | 3 | –1 | $(3r^3 - 2r) \sin \theta$ |
| 8 | 3 | 1 | $(3r^3 - 2r) \cos \theta$ |
| 9 | 3 | 3 | $r^3 \cos 3 \theta$ |
| 10 | 4 | –4 | $r^4 \sin 4 \theta$ |
| 11 | 4 | –2 | $(4r^4 - 3r^2) \sin 2 \theta$ |
| 12 | 4 | 0 | $(6r^4 - 6r^2 + 1)$ |
| 13 | 4 | 2 | $(4r^4 - 3r^2) \cos 2 \theta$ |
| 14 | 4 | 4 | $r^4 \cos 4 \theta$ |
| 15 | 5 | –5 | $r^5 \sin 5 \theta$ |
| 16 | 5 | –3 | $(5r^5 - 4r^3) \sin 3 \theta$ |
| 17 | 5 | –1 | $(10r^5 - 12r^3 + 3r) \sin \theta$ |
| 18 | 5 | 1 | (10r5 – 12r3 + 3r) $\cos \theta$ |
| 19 | 5 | 3 | $(5r^5 - 4r^3) \cos 3 \theta$ |
| 20 | 5 | 5 | $r^5 \cos 5 \theta$ |
| 21 | 6 | –6 | $r^6 \sin 6 \theta$ |
| 22 | 6 | –4 | $(6r^6 - 5r^4) \sin 4 \theta$ |
| 23 | 6 | –2 | $(15r^6 - 20r^4 + 6r^2) \sin 2 \theta$ |
| 24 | 6 | 0 | $(20r^6 - 30r^4 + 12r^2 - 1)$ |
| 25 | 6 | 2 | $(15r^6 - 20r^4 + 6r^2) \cos 2 \theta$ |
| 26 | 6 | 4 | $(6r^6 - 5r^4) \cos 4 \theta$ |
| 27 | 6 | 6 | $r^6 \cos 6 \theta$ |
| 28 | 7 | –7 | $4 r^7 \sin 7 \theta$ |
| 29 | 7 | –5 | $4 (7r^7 - 6r^5) \sin 5 \theta$ |
| 30 | 7 | –3 | $4 (21r^7 - 30r^5 + 10r^3) \sin 3 \theta$ |
| 31 | 7 | –1 | $4 (35r^7 - 60r^5 + 30r^3 - 4r) \sin \theta$ |
| 32 | 7 | 1 | $4 (35r^7 - 60r^5 + 30r^3 - 4r) \cos \theta$ |
| 33 | 7 | 3 | $4 (21r^7 - 30r^5 + 10r^3) \cos 3 \theta$ |
| 34 | 7 | 5 | $4 (7r^7 - 6r^5) \cos 5 \theta$ |
| 35 | 7 | 7 | $4 r^7 \cos 7 \theta$ |

## Références

[1] Trokel SL, Srinivasan R, Braren B. Excimer laser surgery of the cornea. Am J Ophthalmol 1983 ; 96 (6) : 710–5.
[2] Gatinel D. Principes et intérêt de la modélisation cornéenne en chirurgie refractive. In : Saragoussi JJ, Arné JL, Colin J, Montard M, editors. Chirurgie réfractive. Paris : Société Française d'Ophtalmologie et Masson ; 2001. p. 84–95.
[3] Gatinel D. Anatomie cornéenne fonctionnelle appliqué au Lasik. In : Le Lasik, de la Théorie à la Pratique. Paris : Elsevier ; 2003. p. 12–7.
[4] Gatinel D, Malet J. Modélisation cornéenne : mathématiques du Lasik et des profiles d'ablation. In : Le Lasik, de la Théorie à la Pratique. Paris : Elsevier ; 2003. p. 18–24.
[5] Gatinel D. Corneal Topography and Wavefront analysis. In : Albert DM, Jakobiec FA, editors. Principles and Practice of Ophthalmology. 4th ed. Elsevier : Saunders ; 2007.
[6] Sampson WG. Applied optical principles : keratometry. Ophthalmology 1979 ; 86 (3) : 347–51.
[7] Zhu L, Bartsch DU, Freeman WR, Sun PC, Fainman Y. Modeling human eye aberrations and their compensation for high-resolution retinal imaging. Optom Vis Sci 1998 ; 75 (11) : 827–39.
[8] Gatinel D, Haouat M, Hoang-Xuan T. A review of mathematical descriptors of corneal asphericity. J Fr Ophtalmol 2002 ; 25 (1) : 81–90.
[9] Lowe RF, Clark BA. Posterior corneal curvature. Correlations in normal eyes and in eyes involved with primary angle-closure glaucoma. Br J Ophthalmol 1973 ; 57 (7) : 464–70.
[10] Kiely PM, Carney LG, Smith G. Diurnal variations of corneal topography and thickness. Am J Optom Physiol Opt 1982 ; 59 (12) : 976–82.
[11] Edmund C, Sjøntoft E. The central-peripheral radius of the normal corneal curvature. A photokeratoscopic study. Acta Ophthalmol (Copenh) 1985 ; 63 (6) : 670–7.
[12] Guillon M, Lydon DP, Wilson C. Corneal topography : a clinical model. Ophthalmic Physiol Opt 1986 ; 6 (1) : 47–56.
[13] Koretz JF, Kaufman PL, Neider MW, Goeckner PA. Accommodation and presbyopia in the human eye–aging of the anterior segment. Vision Res 1989 ; 29 (12) : 1685–92.
[14] Dunne MC, Royston JM, Barnes DA. Normal variations of the posterior corneal surface. Acta Ophthalmol (Copenh) 1992 ; 70 (2) : 255–61.
[15] Patel S, Reinstein DZ, Silverman RH, Coleman DJ. The shape of Bowman's layer in the human cornea. J Refract Surg 1998 ; 14 (6) : 636–40.
[16] Read SA, Collins MJ, Carney LG, Franklin RJ. The topography of the central and peripheral cornea. Invest Ophthalmol Vis Sci 2006 ; 47 : 1404–15.
[17] Kasprzak HT, Robert Iskander D. Approximating ocular surfaces by generalised conic curves. Ophthalmic Physiol Opt 2006 ; 26 (6) : 602–9.
[18] Maeda N, Klyce SD, Smolek MK. Neural network classification of corneal topography. Preliminary demonstration. Invest Ophthalmol Vis Sci 1995 ; 36 (7) : 1327–35.
[19] Baker TY. Raytracing through non-spherical surfaces. Proc Phys Soc 1943 ; 55 : 361–4.
[20] Mandell RB, Helen R. Mathematical model of the corneal contour. Br J Physiol Opt 1971 ; 26 : 185–97.
[21] Carney LG, Mainstone JC, Henderson BA. Corneal topography and myopia. A cross-sectionnal study. Invest Ophthalmol Vis Sci 1997 ; 38 : 311–20.
[22] Burek H, Douthwaite WA. Mathematical models of the general corneal surface. Ophthalmic Physiol Opt 1993 ; 13 : 68–72.
[23] Eghbali F, Yeung KK, Maloney RK. Topographic determination of corneal asphericity and its lack of effect on the refractive outcome of radial keratotomy. Am J Ophthalmol 1995 ; 119 : 233–6.
[24] Haouat M, Gatinel D, Duong MH, Faraj H, Prisant O, Reyal F, et al. Corneal asphericity in myopes. J Fr Ophtalmol 2002 ; 25 (5) : 488–92.

[25] Gatinel D, Racine L, Hoang-Xuan T. Contribution of the corneal epithelium to anterior corneal topography in patients having myopic photorefractive keratectomy. J Cataract Refract Surg 2007 ; 33 (11) : 1860–5.
[26] Holladay JT, Janes JA. Topographic changes in corneal asphericity and effective optical zone after laser in situ keratomileusis. J Cataract Refract Surg 2002 ; 28 (6) : 942–7.
[27] Lam AK, Douthwaite WA. Measurement of posterior corneal asphericity on Hong Kong Chinese : a pilot study. Ophthalmic Physiol Opt 1997 ; 17 (4) : 348–56.
[28] Schlegel Z, Hoang-Xuan T, Gatinel D. Comparison of and correlation between anterior and posterior corneal elevation maps in normal eyes and keratoconus-suspect eyes. J Cataract Refract Surg 2008 ; 34 (5) : 789–95.
[29] Patel S, Marshall J, Fitzke FI. Shape and radius of posterior corneal surface. Refract Corn Surg 1993 ; 9 : 173–81.
[30] Klyce SD, Smolek MK, Maeda N. Keratoconus detection with the KISA % method-another view. J Cataract Refract Surg 2000 ; 26 (4) : 472–4.
[31] Rabinowitz YS, Rasheed K. KISA % index : a quantitative videokeratography algorithm embodying minimal topographic criteria for diagnosing keratoconus. J Cataract Refract Surg 1999 ; 25 (10) : 1327–35. Erratum in : J Cataract Refract Surg 2000 ; 26 (4) : 480.
[32] Schwiegerling J, Greivenkamp JE, Miller JM. Representation of videokeratoscopic height data with Zernike polynomials. J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis 1995 ; 12 (10) : 2105–13.

Chapitre 8

# *Les cartes d'épaisseur cornéenne (représentation des données pachymétriques)*

La pachymétrie cornéenne est la mesure de l'épaisseur du mur cornéen au moyen d'un instrument : le pachymètre [1]. Cette épaisseur n'est pas uniforme, et décroît progressivement de la périphérie vers un point d'épaisseur minimale (physiologiquement situé dans la région centrale). La pachymétrie ultrasonore fut la première technique permettant au clinicien de connaître l'épaisseur cornéenne. Les mesures fournies par cette technique sont effectuées de manière relativement aléatoire à la surface de la cornée après contact, même s'il est possible de définir grossièrement des territoires (centre, périphérie, quadrants cornéens, etc.) en y plaçant préférentiellement la sonde pour y réaliser plusieurs mesures et calculer une moyenne locale.

D'autres techniques utilisant les propriétés de la lumière sont capables de mesurer avec précision et sans contact l'épaisseur du mur cornéen comme la tomographie par cohérence optique (*Optical Coherence Tomography* : OCT). Cette technique ne permet pas de réaliser une concordance parfaite entre les cartes topographiques antérieures et postérieures. En revanche, la pachymétrie optique fournie par les topographes cornéens à balayage par fente ou caméra Scheimpflug permet de réaliser une cartographie complète de l'épaisseur cornéenne, dont la réalisation est déduite des données de l'élévation antérieure et postérieure (Fig. 8.1) [2]. L'acquisition conjointe des données pachymétriques et topographiques représente un avantage certain dans le cadre du dépistage de pathologies comme le kératocône ou la dégénérescence pellucide marginale. En plus de la mesure locale de l'épaisseur cornéenne, l'étude des variations de l'épaisseur au sein du mur stromal est une donnée importante pour la détection des formes précoces de kératocône.

La mesure pachymétrique optique topographique correspond à la représentation de la distance entre les faces antérieure et postérieure de la cornée. La mesure étant effectuée en différents points, elle fournit un relevé pachymétrique complet du mur cornéen. Malgré ses limitations intrinsèques, la mesure pachymétrique ultrasonore est aujourd'hui considérée comme la technique de référence pour l'appréciation de l'épaisseur cornéenne. Il est possible d'étalonner certains topographes optiques pour maximiser la corrélation entre les valeurs fournies par ces instruments et la mesure ultrasonique (ex : facteur acoustique, indiqué sur les cartes pachymétriques optiques effectuées par l'Orbscan) [2].

On peut synthétiser les informations fournies en représentant des moyennes calculées sur des zones (surfaces) définies, ou encore en représentant un profil pachymétrique moyen. Ceci est particulièrement intéressant dans le cadre du dépistage du kératocône infraclinique.

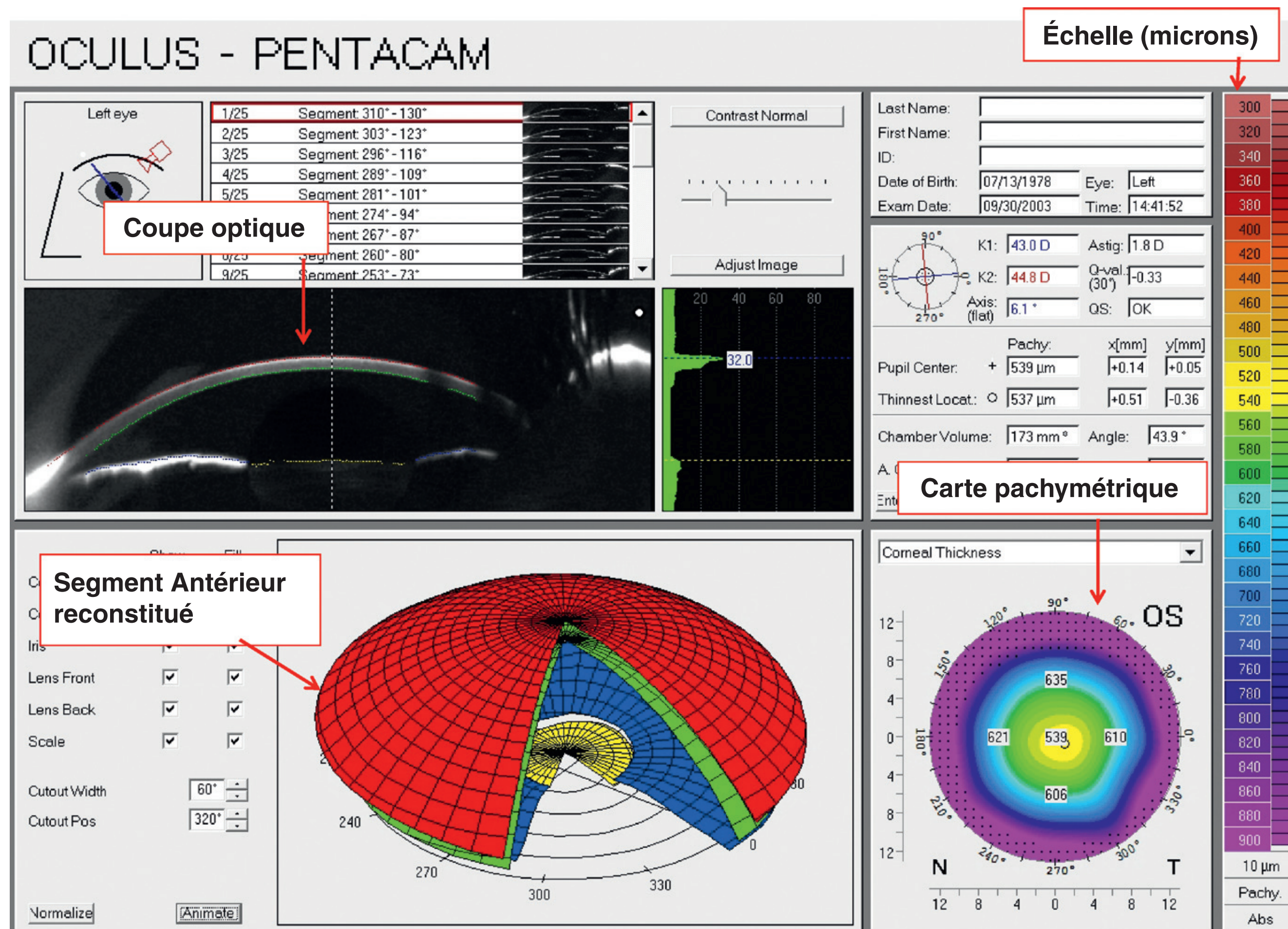



*Fig. 8.1.* ***Relevé pachymétrique (en bas à gauche) obtenu par balayage rotatif par caméra Scheimpflug.*** *Une coupe des images saisies par la caméra, réalisant une coupe optique du segment antérieur est visible au milieu.*

# Interprétation des cartes d'épaisseur totales

L'analyse d'une carte d'épaisseur (carte pachymétrique totale) (Fig. 8.2) doit porter sur les points suivants.

## Point d'épaisseur minimale

L'épaisseur minimale de la cornée est une donnée importante en chirurgie réfractive, que ce soit pour planifier l'épaisseur de découpe et de photoablation stromale (Lasik) ou dépister une forme fruste de kératocône.

Le point d'épaisseur minimale (*thinnest point*) est généralement situé à moins de 1 mm du centre géométrique de la cornée. Indépendamment de sa valeur, l'augmentation de la distance avec le centre géométrique de la cornée doit faire évoquer la possibilité d'un kératocône débutant (Fig. 8.3), en particulier quand cet éloignement s'effectue vers le bas (composante verticale négative; la composante horizontale du déplacement doit être interprétée en fonction de la valeur de l'angle kappa; *cf.* chapitre 3 Fig 3.6), et quand l'emplacement du point le plus fin est proche ou confondu avec l'apex et l'élévation maximale antérieure et surtout postérieure.

Une étude réalisée avec le topographe Pentacam a retrouvé chez des sujets sains une épaisseur moyenne de 520 ± 33 µm au centre de la pupille, et de 515 ± 36 µm pour le point d'épaisseur minimale, localisé dans le quadrant temporal inférieur pour la majorité des sujets [3]. L'écart en distance avec le centre géométrique de la cornée est corrélé avec la différence entre l'épaisseur centrale moyenne et ce point [4].

## Pachymétrie centrale

La valeur moyenne pachymétrique centrale peut être mesurée au centre géométrique de la cornée, en regard du centre de la pupille, du vertex, ou encore estimé selon une moyenne calculée pour un diamètre spécifié par l'utilisateur (exemple : 2 mm centraux; Fig. 8.4). Elle renseigne sur l'épaisseur de la partie centrale de la cornée, qui est physiologiquement la moins épaisse du mur cornéen. Il existe de larges variations interindividuelles (facteurs génétiques, ethniques, etc.), et la valeur de la pachymétrie centrale moyenne est estimée à 536 ± 31 µm dans la population caucasienne [5].

L'utilisation du mode *Normal Band Scale* avec le topographe Orbscan permet d'identifier rapidement les zones plus minces (à plus de deux écarts-types sous la moyenne) ou plus épaisses (à plus de deux écarts-types au-dessus de la moyenne) (Fig. 8.5). Ce mode ne fournit

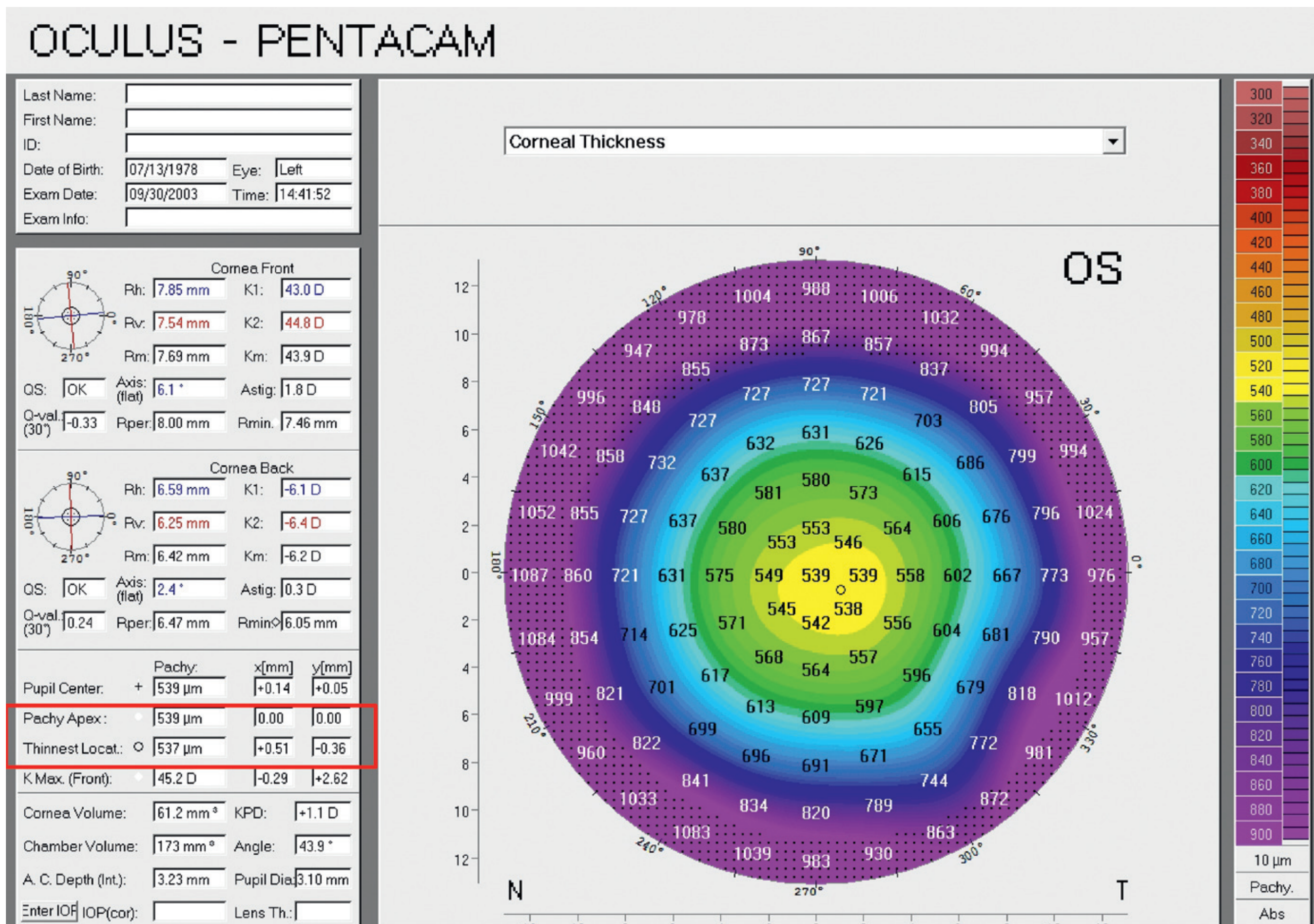



**Fig. 8.2.** *Carte d'épaisseur cornéenne* (Corneal Thickness).
*Les valeurs numériques superposées au relevé colorimétrique correspondent à des valeurs locales. La valeur de l'épaisseur cornéenne en regard de l'apex, ainsi que l'épaisseur minimale sont mentionnées dans l'encadré gauche.*

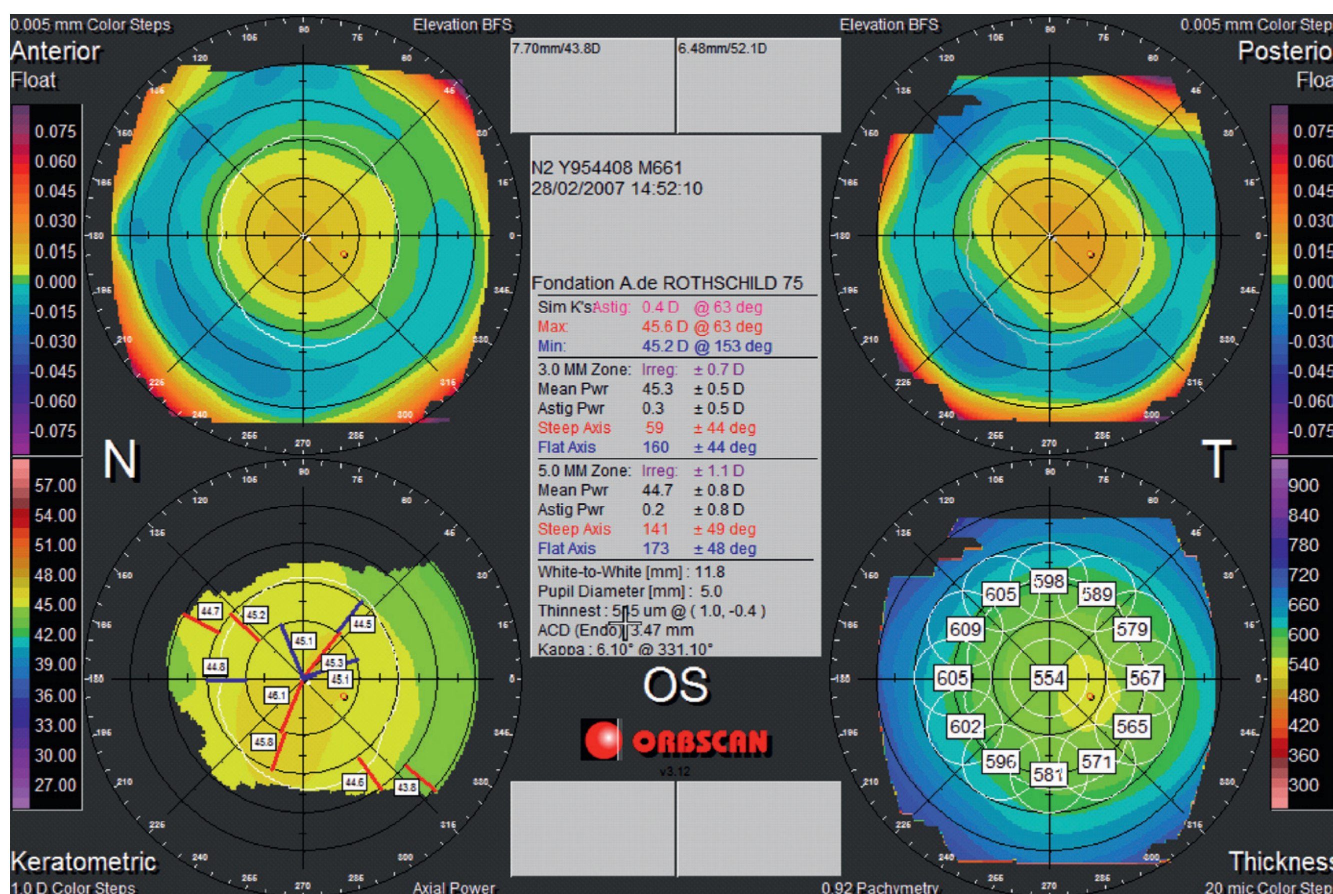



**Fig. 8.3.** *Relevé* Quad Map *(Orbscan) de la cornée gauche, chez un patient greffé pour un kératocône avéré de l'œil droit.*
*Noter le décentrement relatif du point le plus fin en temporal inférieur, alors que l'élévation antérieure est relativement centrée. Cette carte souligne la précocité de la modification de l'épaisseur cornéenne dans l'évolution du kératocône. Chez ce patient, l'élévation antérieure, l'élévation postérieure et la courbure axiale sont sans particularités.*

pas d'indication sur la manière dont varie l'épaisseur cornéenne (il ne permet pas de détecter un amincissement rapide de la cornée si la valeur d'épaisseur minimale demeure « dans la norme »).

La pachymétrie centrale est un paramètre d'importance pour le calcul du mur résiduel postérieur en chirurgie photoablative. La présence d'une épaisseur centrale inférieure à la moyenne a été identifiée comme un facteur de risque d'ectasie iatrogène post-Lasik ; la présence souvent conjointe d'atypies topographiques et un âge jeune accroissent certainement le risque de cette complication [6]. La mesure de la valeur de la pachymétrie centrale joue également un rôle dans la stratégie diagnostique du glaucome chronique à angle ouvert, car les cornées fines sont associées à un risque accru d'apparition ou progression de la maladie glaucomateuse chez les sujets à risques [7].

## Pachymétrie périphérique

La mesure de la pachymétrie périphérique a une valeur différentielle. La présence d'un amincissement inférieur relatif est un argument de poids en faveur du diagnostic de dégénérescence pellucide marginale de la cornée (Fig. 8.6) ; la topographie de l'amincissement permet parfois de différencier la dégénérescence pellucide marginale et le kératocône. À l'inverse, l'absence d'amincissement notable malgré la présence d'une asymétrie cornéenne est en faveur d'un *corneal warpage*.

Un épaississement cornéen central est parfois observé en cas d'œdème stromal lié à l'évolution tardive d'une dystrophie de Fuchs (Fig. 8.7).

Après chirurgie réfractive au laser excimer, l'examen de la carte pachymétrique d'un œil opéré permet d'estimer rétrospectivement la profondeur de la photoablation. L'altération de la transparence des milieux cornéens (kératite épithéliale, haze) est responsable d'une sous-estimation de la pachymétrie cornéenne avec la technique de balayage par fente (Orbscan). Cet artefact est lié à une erreur de détection du tracé de la face postérieure lors de l'analyse informatisée de l'image des fentes balayantes. Chez les patients ayant été opérés de kératotomie radiaire et dont la cornée est claire, la pachymétrie optique semble fiable, comme en atteste la conservation de l'épaisseur moyenne de la cornée, liée à la conservation attendue du parallélisme entre ses faces antérieure et postérieure (Fig. 8.8).

## Symétrie entre les cartes pachymétriques des cornées droite et gauche

Comme il découle de facteurs morphologiques des faces antérieures et postérieures, la présence d'un haut degré d'énantiomorphisme concerne également la répartition de l'épaisseur cornéenne : valeur et localisation du point le plus fin, valeur de la pachymétrie centrale moyenne, etc. *A contrario*, la présence d'un faible énantiomorphisme pachymétrique chez un patient indemne d'antécédents

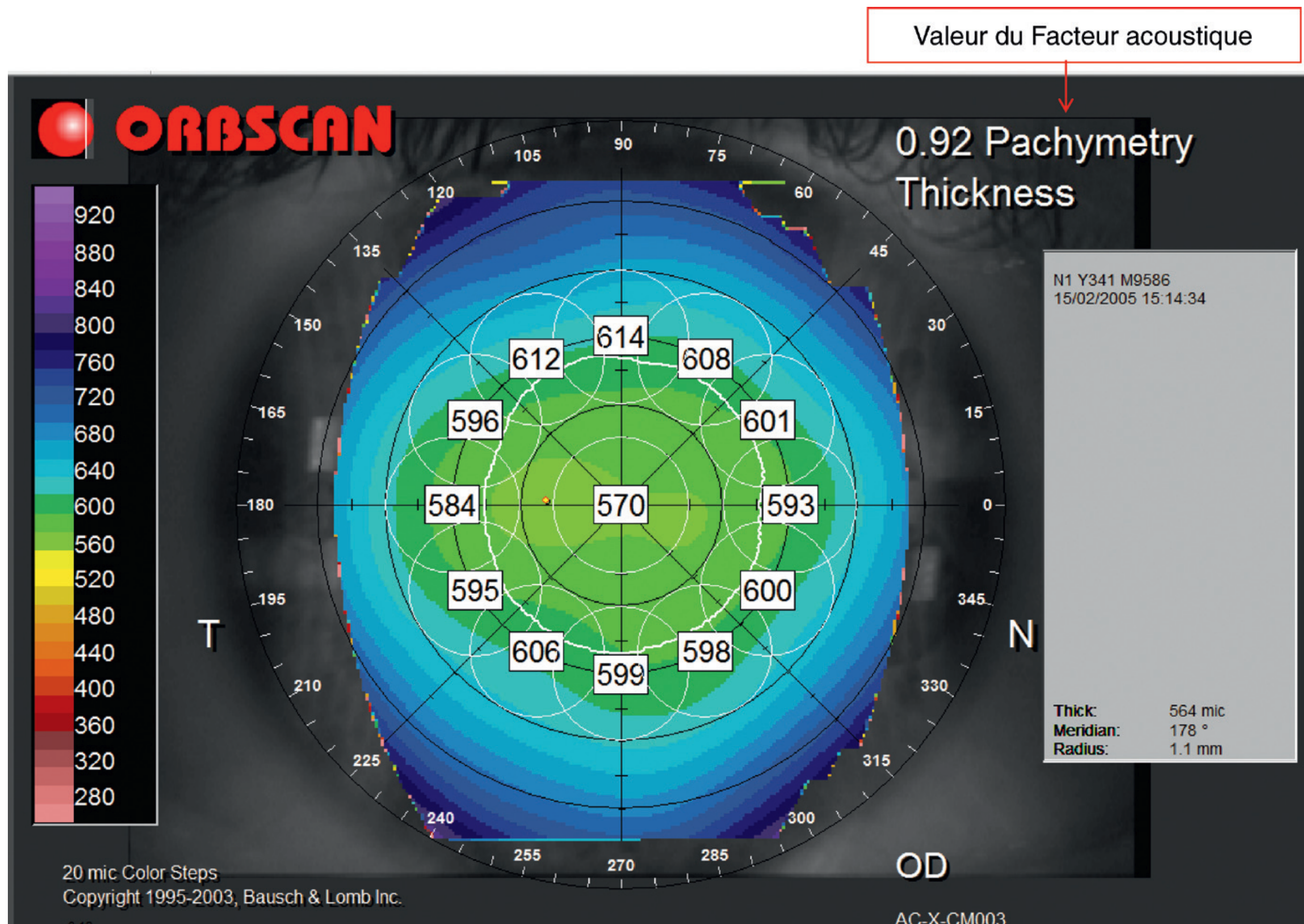



**Fig. 8.4.** *Carte d'épaisseur totale cornéenne.*
*Les valeurs numériques correspondent à des moyennes d'épaisseur, effectuées sur des surfaces de pourtour circulaire (de diamètre égal à 2 mm). La valeur moyenne de l'épaisseur cornéenne dans les 2 mm centraux est mesurée à 570 µm, soit environ un écart-type au-dessus de la moyenne d'une population normale de référence. Le point le plus fin est situé à 1,1 mm en temporal du centre de la carte pachymétrique. L'angle kappa mesure 4° sur l'hémiméridien à 200°; il participe au déplacement apparent de ce point.*

ophtalmologiques cornéens médicaux et chirurgicaux doit faire suspecter la présence d'une pathologie cornéenne associée (ex : kératocône débutant). Khachikian *et al.* ont rapporté une différence moyenne intra-individuelle (entre les deux yeux) de 9,00 ± 8,3 µm pour le point le plus fin [8]. D'autres auteurs ont rapporté un résultat similaire avec une différence moyenne de 8,42 µm [9]. De nombreux indices pointent vers la face postérieure et la pachymétrie (ces deux paramètres étant liés) comme paramètres topographiques susceptibles d'étayer le diagnostic précoce du kératocône. Nous avons rapporté la survenue d'une ectasie cornéenne chez un patient dont les topographies cornéennes étaient sans particularité, en dehors d'une différence pachymétrique moyenne centrale d'environ 30 µm [8].

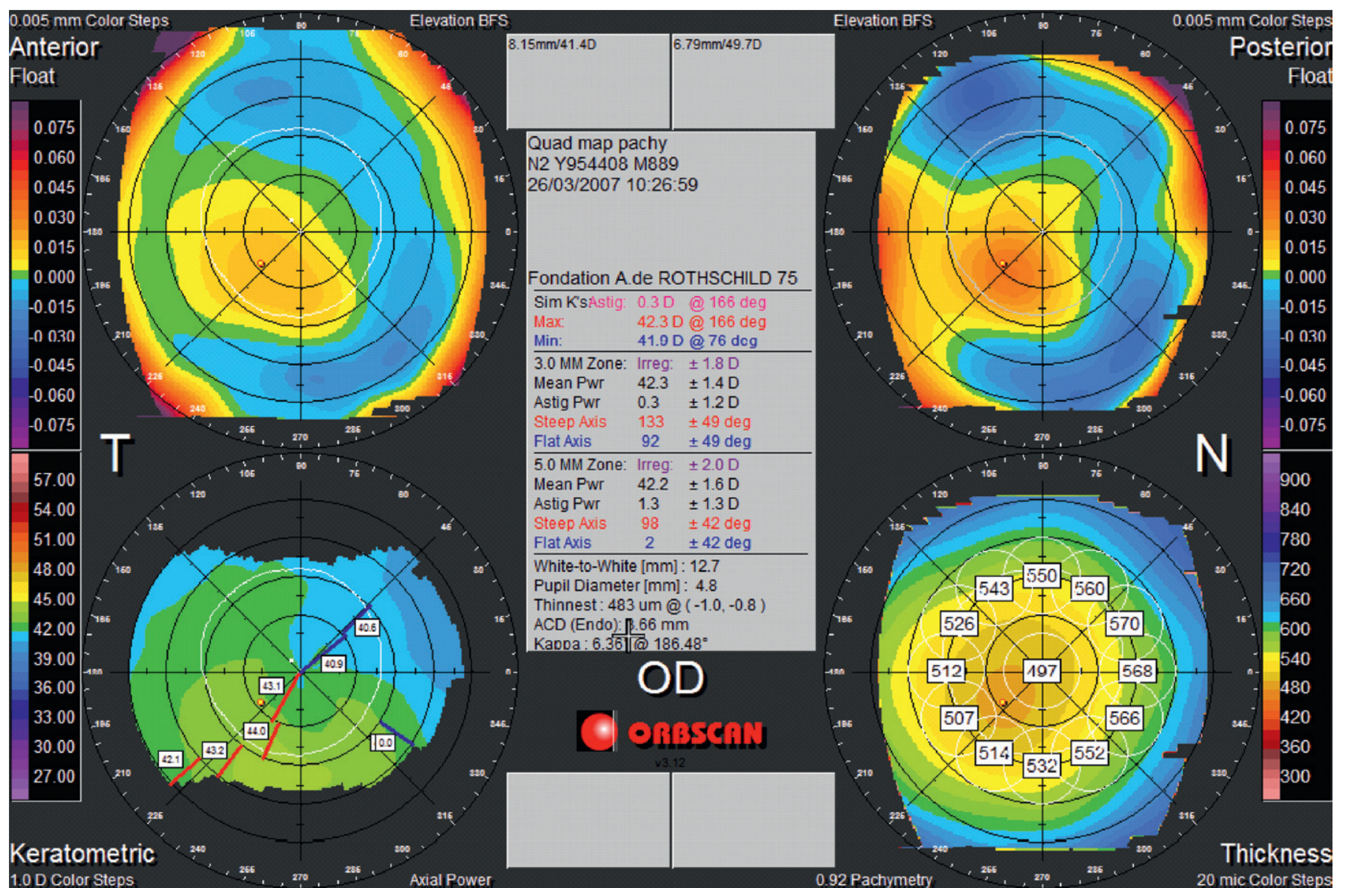
## Interprétation des cartes de profil pachymétrique

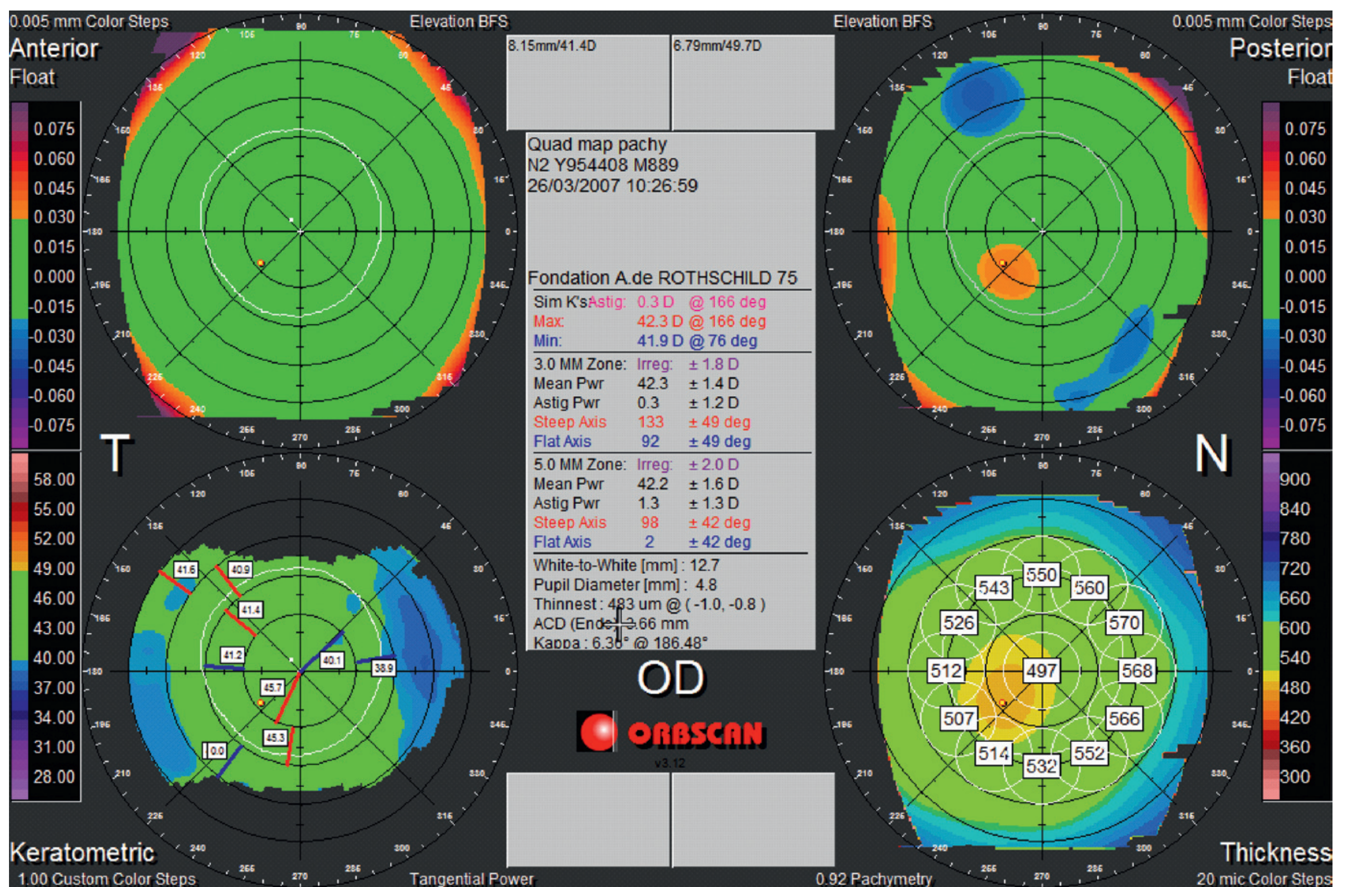
La représentation du profil pachymétrique revêt un grand intérêt dans le cadre du dépistage des formes précoces de kératocône [11]. Elle est proposée par le logiciel du topographe Pentacam sous deux aspects.

### Représentation spatiale du profil pachymétrique (*Corneal Thickness Spatial Profile* : CTSP)

À partir du point d'épaisseur minimale, les données pachymétriques (l'ensemble des points de mesure) sont réparties en différentes zones annulaires concentriques, dont la largeur est de 2 mm par défaut. Une valeur d'épaisseur moyenne est obtenue pour chaque zone. Les valeurs sont reportées sur graphique où figurent les valeurs moyennes mesurées dans une population de référence (et encadrées par l'ajout et la soustraction de deux écarts-types, l'ensemble définissant alors une « bande de normalité », considérée comme un intervalle de confiance) (Fig. 8.9).

Cette courbe permet de comparer l'épaisseur d'une cornée à une référence (population moyenne), et ce pour différentes zones. La régularité de la courbe renseigne de manière qualitative sur la répartition spatiale de l'épaisseur cornéenne. La Fig. 8.10 montre la variation excessive d'épaisseur entre le centre (excessivement aminci) et la périphérie.


0.005 mm Color Steps
Anterior
Float
Elevation BFS
8.15mm/41.4D
6.79mm/49.7D
Elevation BFS
0.005 mm Color Steps
Posterior
Float
Quad map pachy
N2 Y954408 M889
26/03/2007 10:26:59
Fondation A.de ROTHSCHILD 75
Sim K's Astig: 0.3 D @ 166 deg
Max: 42.3 D @ 166 deg
Min: 41.9 D @ 76 deg
3.0 MM Zone: Irreg: ± 1.8 D
Mean Pwr 42.3 ± 1.4 D
Astig Pwr 0.3 ± 1.2 D
Steep Axis 133 ± 49 deg
Flat Axis 92 ± 49 deg
5.0 MM Zone: Irreg: ± 2.0 D
Mean Pwr 42.2 ± 1.6 D
Astig Pwr 1.3 ± 1.3 D
Steep Axis 98 ± 42 deg
Flat Axis 2 ± 42 deg
White-to-White [mm] : 12.7
Pupil Diameter [mm] : 4.8
Thinnest : 483 um @ ( -1.0, -0.8 )
ACD (Endo): 3.66 mm
Kappa : 6.36° @ 186.48°
OD
ORBSCAN
T
N
Keratometric
1.0 D Color Steps
Axial Power
0.92 Pachymetry
Thickness
20 mic Color Steps


0.005 mm Color Steps
Anterior
Float
Elevation BFS
8.15mm/41.4D
6.79mm/49.7D
Elevation BFS
0.005 mm Color Steps
Posterior
Float
Quad map pachy
N2 Y954408 M889
26/03/2007 10:26:59
Fondation A.de ROTHSCHILD 75
Sim K's Astig: 0.3 D @ 166 deg
Max: 42.3 D @ 166 deg
Min: 41.9 D @ 76 deg
3.0 MM Zone: Irreg: ± 1.8 D
Mean Pwr 42.3 ± 1.4 D
Astig Pwr 0.3 ± 1.2 D
Steep Axis 133 ± 49 deg
Flat Axis 92 ± 49 deg
5.0 MM Zone: Irreg: ± 2.0 D
Mean Pwr 42.2 ± 1.6 D
Astig Pwr 1.3 ± 1.3 D
Steep Axis 98 ± 42 deg
Flat Axis 2 ± 42 deg
White-to-White [mm] : 12.7
Pupil Diameter [mm] : 4.8
Thinnest : 483 um @ ( -1.0, -0.8 )
ACD (Endo): 3.66 mm
Kappa : 6.36° @ 186.48°
OD
ORBSCAN
T
N
Keratometric
1.00 Custom Color Steps
Tangential Power
0.92 Pachymetry
Thickness
20 mic Color Steps

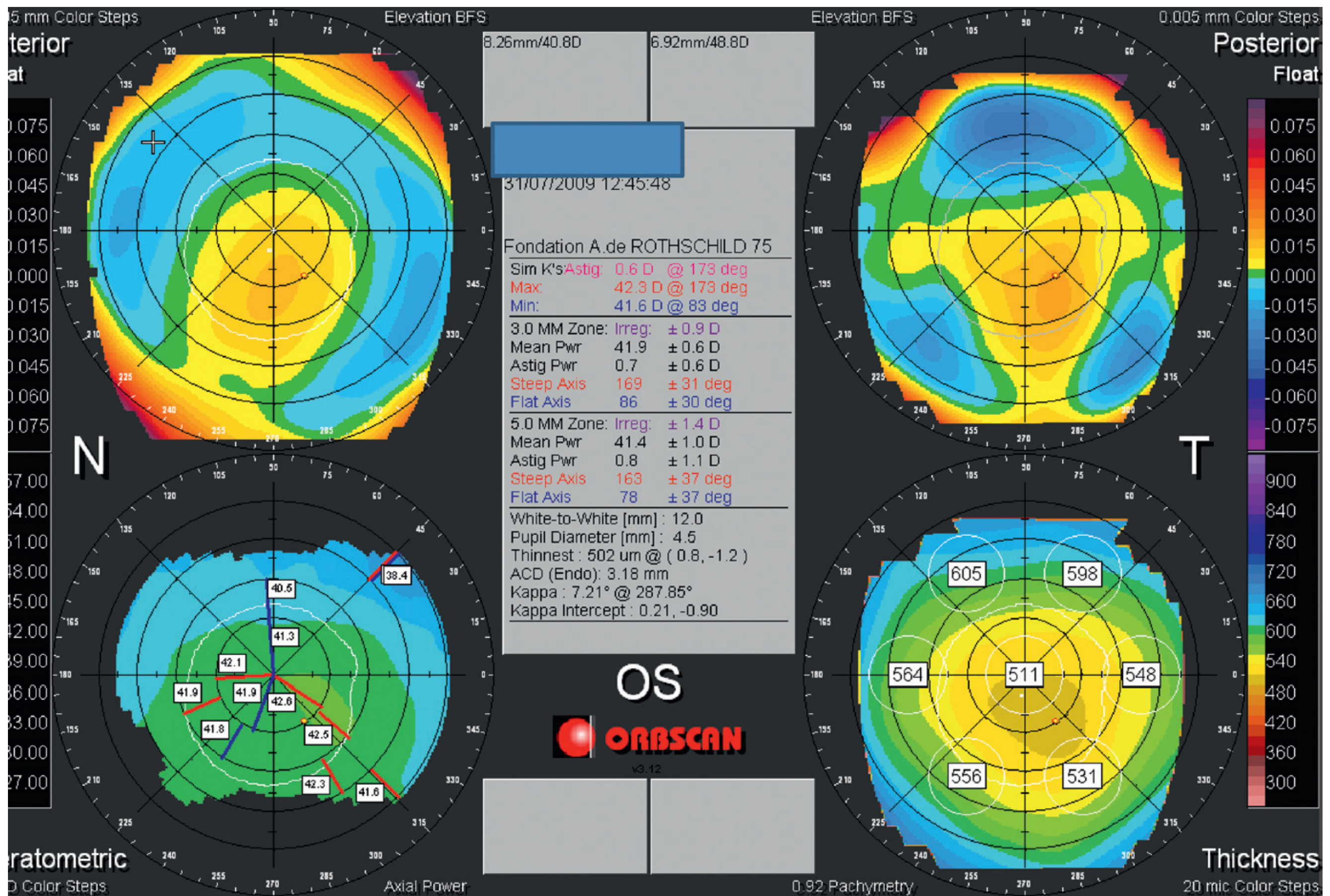



***Fig. 8.6.*** ***Aspect topographique et pachymétrique évocateur de dégénérescence marginale pellucide débutante.***
*On note un amincissement cornéen paracentral inférieur, avec décentrement inférieur du point le plus fin. Noter la diminution de l'épaisseur pachymétrique globale de la cornée en inférieur. La constatation sur la carte de courbure axiale d'un astigmatisme inverse légèrement irrégulier, ainsi que la présence d'une « coulée inférieure d'élévation positive » au niveau de la carte d'élévation postérieure renforcent la suspicion diagnostique.*

## Représentation du pourcentage d'épaississement périphérique (*Percentage Thickness Increase* : PTI)

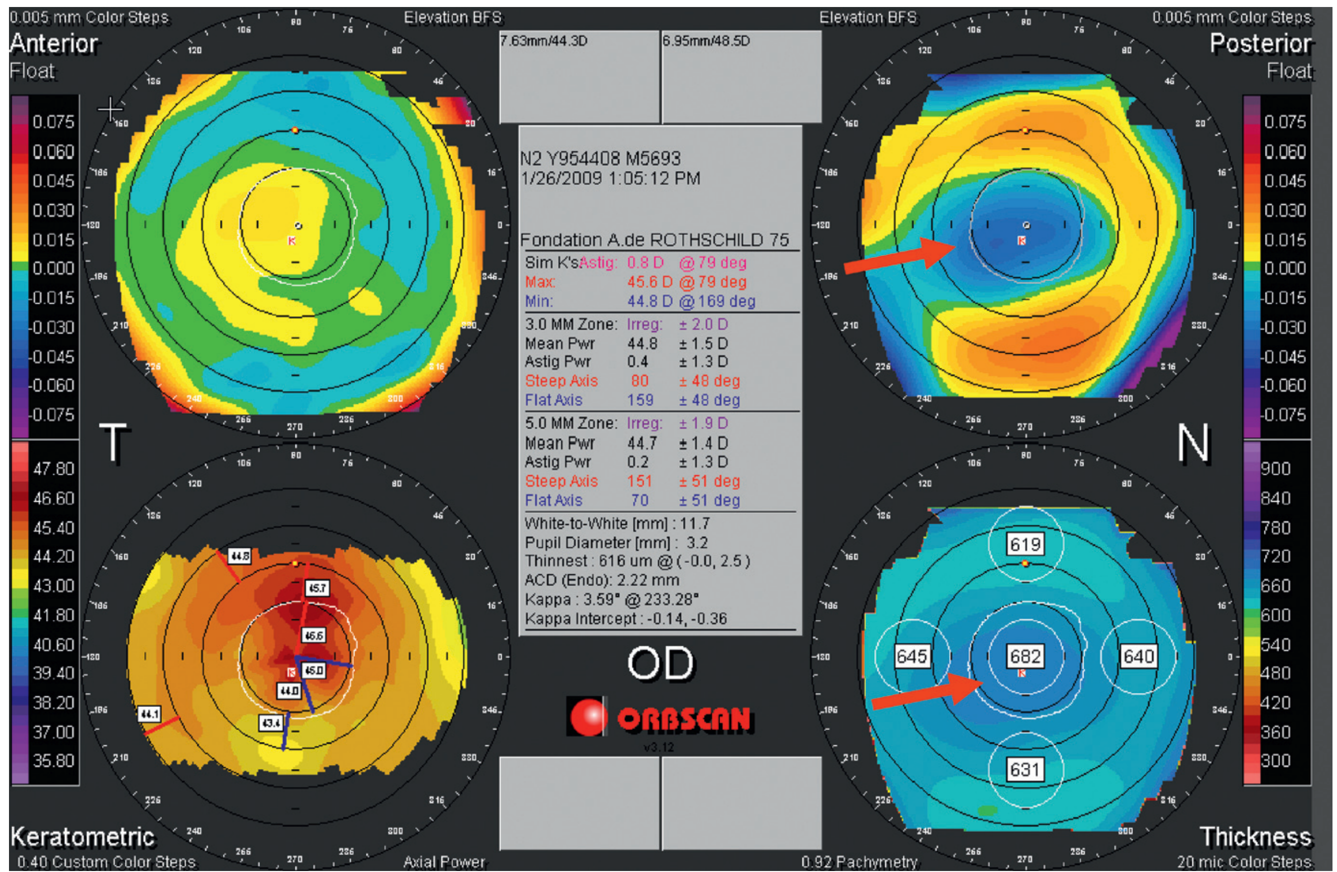
À partir de la valeur du point d'épaisseur minimale et des valeurs moyennes pour chacune des zones annulaires concentriques, le pourcentage d'épaississement périphérique est calculé comme suit :

(Épaisseur de la zone considérée – Épaisseur minimale périphérique)/ Épaisseur minimale périphérique

Le chiffre obtenu représente le taux d'accroissement de l'épaisseur cornéenne périphérique pour une zone concentrique donnée, « normalisé » vis-à-vis de l'épaisseur minimale. Plus ce chiffre est élevé, plus l'épaississement vers la périphérie cornéenne est rapide. Ceci traduit de manière équivalente (mais cliniquement plus pertinente) la présence d'un amincissement rapide vers le point d'épaisseur minimale : l'axe des ordonnées du graphique est gradué de telle manière que la courbe s'infléchit alors vers le bas (Fig. 8.9). Pour chaque zone annulaire, les valeurs normales encadrées des limites (plus ou moins deux écarts-types) sont rapportées.

L'intérêt de ce graphique est de mettre en évidence une « accélération » de l'amincissement physiologique central, indépendamment des chiffres d'épaisseur cornéenne. Une réduction rapide de l'épaisseur cornéenne centrale doit faire évoquer en premier lieu un kératocône débutant, même si l'épaisseur cornéenne minimale

◄ ***Fig. 8.5.*** ***Comparaison entre mode*** **Quad Map** ***par défaut et utilisant l'échelle avec bande de normalité (*****Normal Band Scale*****) selon le topographe Orbscan.***
*a. La présence d'une légère augmentation de la cambrure inférieure (mode axial), ainsi que le décalage temporal inférieur des îlots d'élévation positive (asphéricité prolate) et la relative réduction de l'épaisseur cornéenne centrale font suspecter la présence d'une forme fruste de kératocône, et ce malgré l'absence de positivité des critères Placido de Klyce et Maeda après analyse en topographie spéculaire seule.*
*b. Comparaison entre mode* Quad Map *par défaut et utilisant l'échelle avec bande de normalité (*Normal Band Scale*) selon le topographe Orbscan. Pour chacune des cartes, les points dont les valeurs numériques sont situées dans une « bande de normalité » (moyenne ± deux écarts-types) sont représentés par une couleur verte. Le mode* Normal Band Scale *permet de souligner la zone d'amincissement pathologique, alors que la périphérie stromale possède une épaisseur supérieure à la normale ! Ce mode met en lumière la présence d'un amincissement excessif paracentral temporal inférieur, avec une élévation postérieure accentuée. Il est intéressant de noter que la périphérie cornéenne présente une cambrure légèrement moindre que la moyenne.*



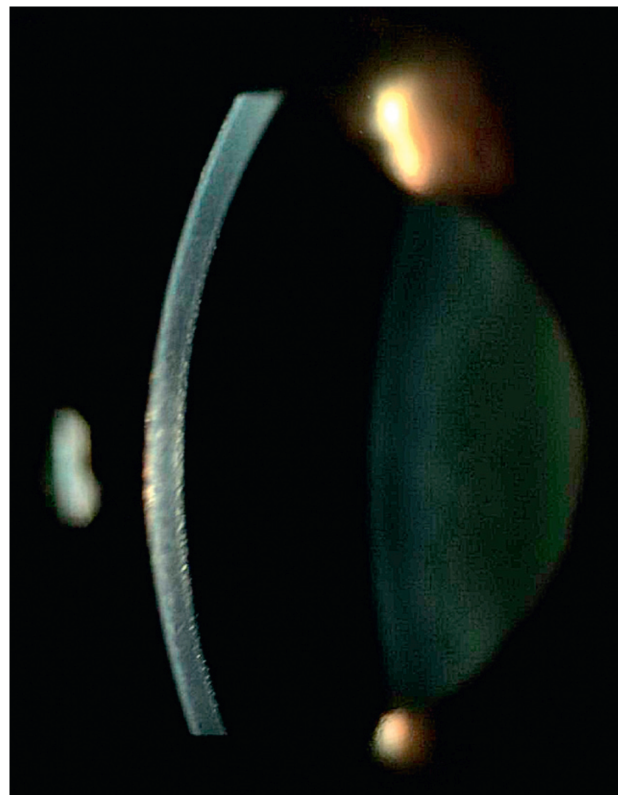



**Fig. 8.7.** *Topographie Orbscan chez un patient présentant une dystrophie de Fuchs évoluée (densité endothéliale inférieure à 700 cellules/mm²).*
*a. L'augmentation d'épaisseur centrale est liée à l'œdème stromal, et se fait essentiellement aux dépens du stroma postérieur, dont la géométrie en élévation est oblate (noter la partie centrale de la surface cornéenne postérieure située sous la sphère de référence). b. Aspect biomicroscopique.*

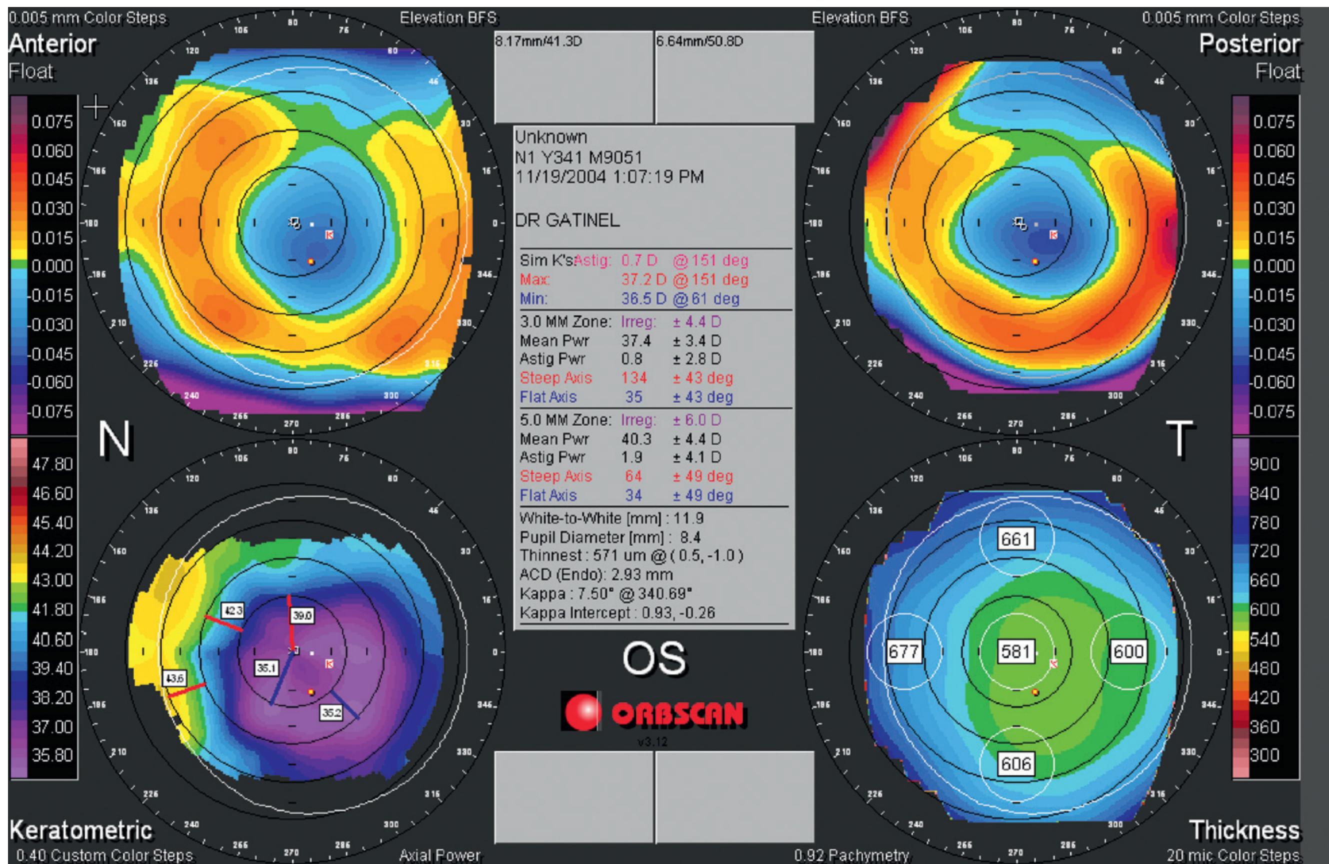



**Fig. 8.8. *Carte topograhique Orbscan chez un patient opéré de kératotomie radiaire.***
*Noter la conservation de l'épaisseur cornéenne, accompagnée d'une géométrie oblate des faces antérieures et postérieures, qui traduit la conservation du parallélisme antéropostérieur, attendue dans ce contexte.*

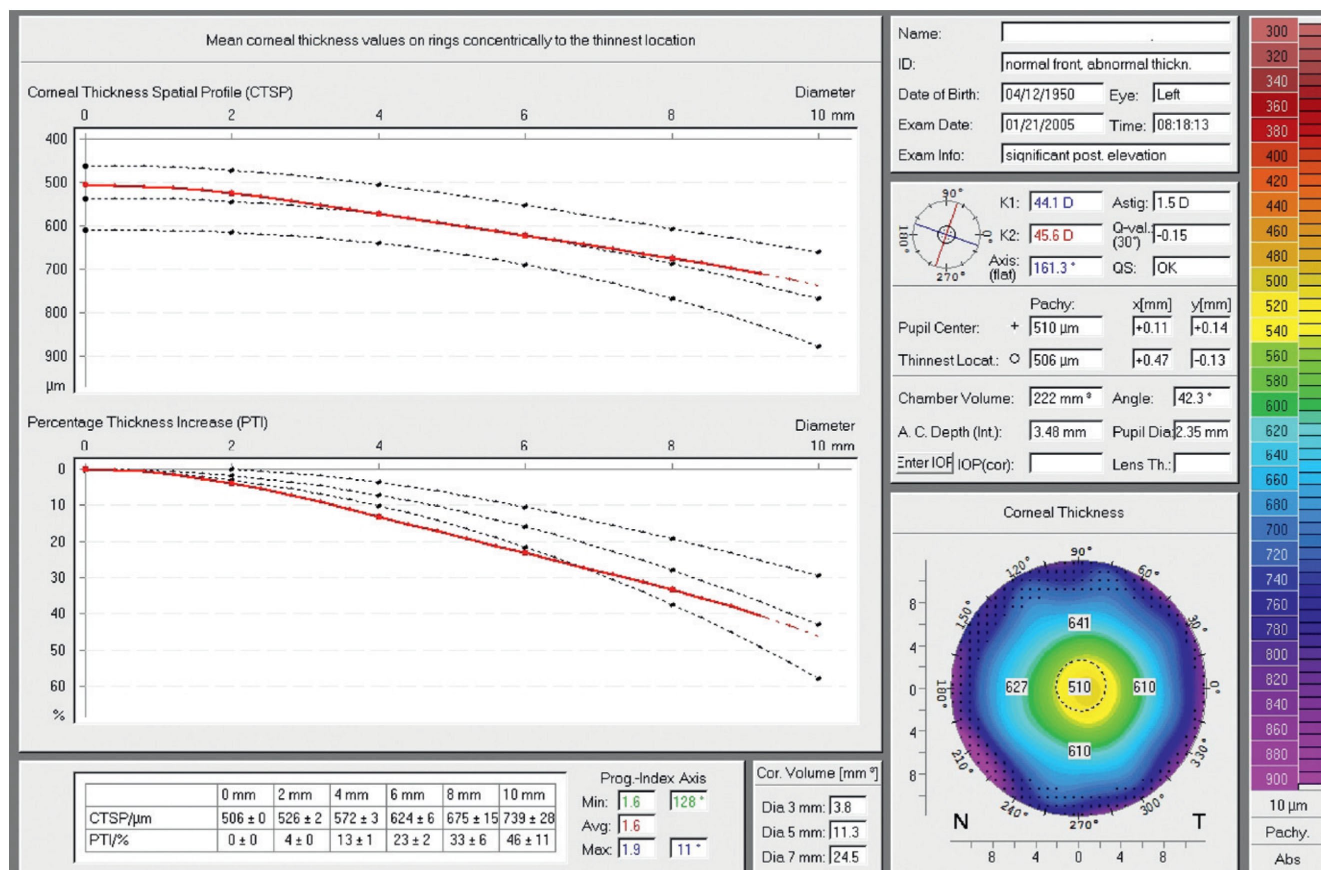
est proche ou supérieure à la moyenne. L'amincissement cornéen est l'élément dominant du tableau de kératocône, et peut être observé précocement au cours de l'évolution de cette maladie.

## Indications actuelles et futures de la mesure pachymétrique

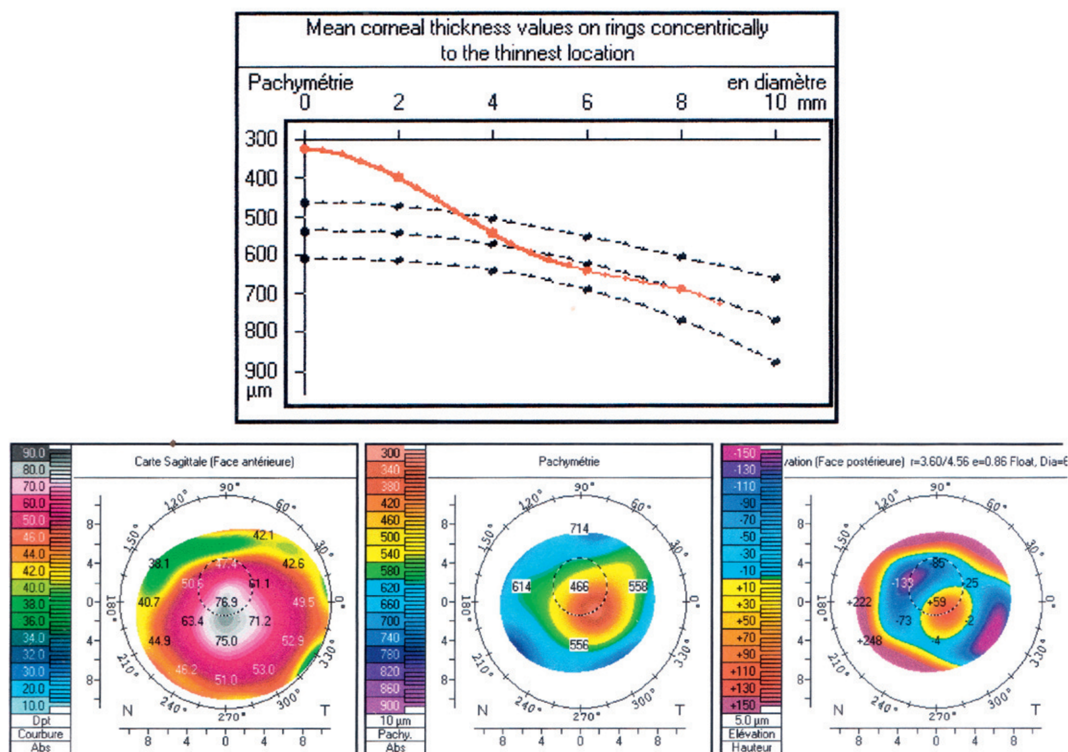
La mesure pachymétrique totale (tomographie cornéenne) revêt un intérêt diagnostique et/ou pronostique dans des affections et contextes cliniques variés, qu'ils soient centrés sur une affection cornéenne (œdème cornéen, kératopathie bulleuse, dystrophies cornéennes endothéliales, dystrophie de Fuchs, suites de kératoplastie transfixiante ou lamellaire, suspicion de kératocône, chirurgie réfractive cornéenne photoablative, chirurgie cornéenne relaxante) ou non (glaucome).

L'attention portée aux cartes de pachymétrie est particulièrement justifiée dans le contexte de la chirurgie réfractive, où des indices comme le décentrement du point d'épaisseur minimale et le « rythme » d'amincissement central sont des indices supplémentaires qui permettent de soulever l'hypothèse d'un kératocône infraclinique chez un patient dont les cornées présentent une légère asymétrie avec réduction de l'énantiomorphisme.

Les cartes pachymétriques mesurent l'épaisseur totale du mur cornéen, sans pouvoir discerner les épaisseurs respectives des couches stromales et épithéliales. L'épithélium cornéen est un puissant modulateur de la surface cornéenne, et certaines études suggèrent qu'il pourrait masquer les irrégularités topographiques débutantes rencontrées dans les premiers stades du kératocône [12, 13]. Dans le futur, la combinaison de techniques comme la tomographie de cohérence optique, ou l'échographie à très haute fréquence pourra certainement permettre au clinicien d'accéder à la réalisation de cartes topographiques et pachymétriques spécifiques d'un contingent tissulaire cornéen particulier.




◗ ***Fig. 8.9.*** ***Représentation du profil pachymétrique cornéen (topographe Pentacam).***
*Le graphique situé en haut correspond au profil d'épaisseur cornéenne (CTSP). La courbe correspondant à l'épaisseur moyenne de la cornée pour une distance au centre donnée est tracée en rouge. Dans cet exemple, elle est comprise dans la bande définie par la valeur moyenne ± deux écarts-types. Le graphique en bas correspond au pourcentage d'épaississement cornéen (PTI). La courbe « sort » de la bande de normalité, traduisant une progression rapide de l'épaississement du centre vers les bords (autrement dit, un amincissement central plus rapide). Dans cet exemple, la présence d'un kératocône débutant explique cet amincissement central rapide.*




◗ ***Fig. 8.10.*** ***Représentation de la carte de pachymétrie totale (en bas au milieu) et du profil pachymétrique cornéen (topographe Allegro Oculyzer, Wavelight) pour une cornée atteinte de kératocône avancé.***
*Le graphique situé en haut correspond au profil d'épaisseur cornéenne (CTSP). La courbe correspondant à l'épaisseur moyenne de la cornée pour une distance au centre donnée est tracée en rouge. Cet exemple montre le caractère excessif et rapide de l'amincissement naturel vers le centre de la cornée.*

## Références


[1] Yaylali V, Kaufman SC, Thompson HW. Corneal thickness measurements with the Orbscan Topography System and ultrasonic pachymetry. Cataract Refract Surg 1997 ; 23 (9) : 1345–50.

[2] Ashwin PT, Shah S, Pushpoth S, Wehbeh L, Ilango B. The relationship of Central Corneal Thickness (CCT) to Thinnest Central Cornea (TCC) in healthy adults. Cont Lens Anterior Eye 2009 ; 32 (2) : 64–7.

[3] Prisant O, Calderon N, Chastang P, Gatinel D, Hoang-Xuan T. Reliability of pachymetric measurements using orbscan after excimer refractive surgery. Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol 2007 ; 245 (12) : 1759–63.

[4] Jonsson M, Behndig A. Pachymetric evaluation prior to laser in situ keratomileusis. J Cataract Refract Surg 2005 ; 31 : 701–6.

[5] Doughty MJ, Zaman ML. Human corneal thickness and its impact on intraocular pressure measures : a review and meta-analysis approach. Surv Ophthalmol 2000 ; 44 (5) : 367–408.

[6] Randleman JB, Trattler WB, Stulting RD. Validation of the Ectasia Risk Score System for preoperative laser in situ keratomileusis screening. Am J Ophthalmol 2008 ; 145 (5) : 813–8.

[7] Kotecha A. What biomechanical properties of the cornea are relevant for the clinician? Surv Ophthalmol 2007 ; 52 (Suppl. 2) : S109–14.

[8] Khachikian SS, Belin MW, Ciolino JB. Intrasubject corneal thickness asymmetry. J Refract Surg 2008 ; 24 : 606–9.

[9] Falavarjani KG, Modarres M, Joshaghani M, Azadi P, Afshar AE, Hodjat P. Interocular differences of the Pentacam measurements in normal subjects. Clin Exp Optom 93 : 26–30.

[10] Saad A, Gatinel D. Bilateral corneal ectasia after laser in situ kerateumileusis in a patient with an isolated difference in central corneal thickness between both eyes. J Cataract Refract Surg 2010 ; 36 (6) : 1033–5.

[11] Luz A, Ursulino M, Ambrósio R Jr. Corneal thickness variation from the thinnest point to the limbus : study based in a normal and kerato-conus population for creating reference values. Arch Bras Oftalmol 2006 ; 69 : 579–83.

[12] Gatinel D, Racine L, Hoang-Xuan T. Contribution of the corneal epithelium to anterior corneal topography in 14 patients having myopic photorefractive keratectomy. J Cataract Refract Surg 2007 ; 33 (11) : 1860–5.

[13] Reinstein DZ, Archer TJ, Gobbe M. Corneal epithelial thickness profile in the diagnosis of keratoconus. J Refract Surg 2009 ; 25 (7) : 604–10.


## Pour en savoir plus


Altan-Yaycioglu R, Pelit A, Akova YA. Comparison of ultrasonic pachymetry with Orbscan in corneal haze. G Ophthalmology 2003 ; 110 (3) : 511–5.

Auffarth GU, Wang L, Völcker HE. Keratoconus evaluation using the Orbscan Topography System. J Cataract Refract Surg 2000 ; 26 : 222–8.

Lackner B, Schmidinger G, Pieh S, Funovics MA, Skorpik C. Repeatability and reproductibility of central corneal thickness measurement with Pentacam, Orbscan, and ultrasound. Optom Vis Sci 2005 ; 82 (10) : 892–9.

Rao SN, Raviv T, Majmudar PA, Epstein RJ. Role of Orbscan II in screening keratoconus suspects before refractive corneal surgery. Ophthalmology 2002 ; 109 : 1642–6.

Chapitre 9

# *Principes et intérêt des cartes différentielles*

*Obtention d'une carte différentielle*

*Applications*

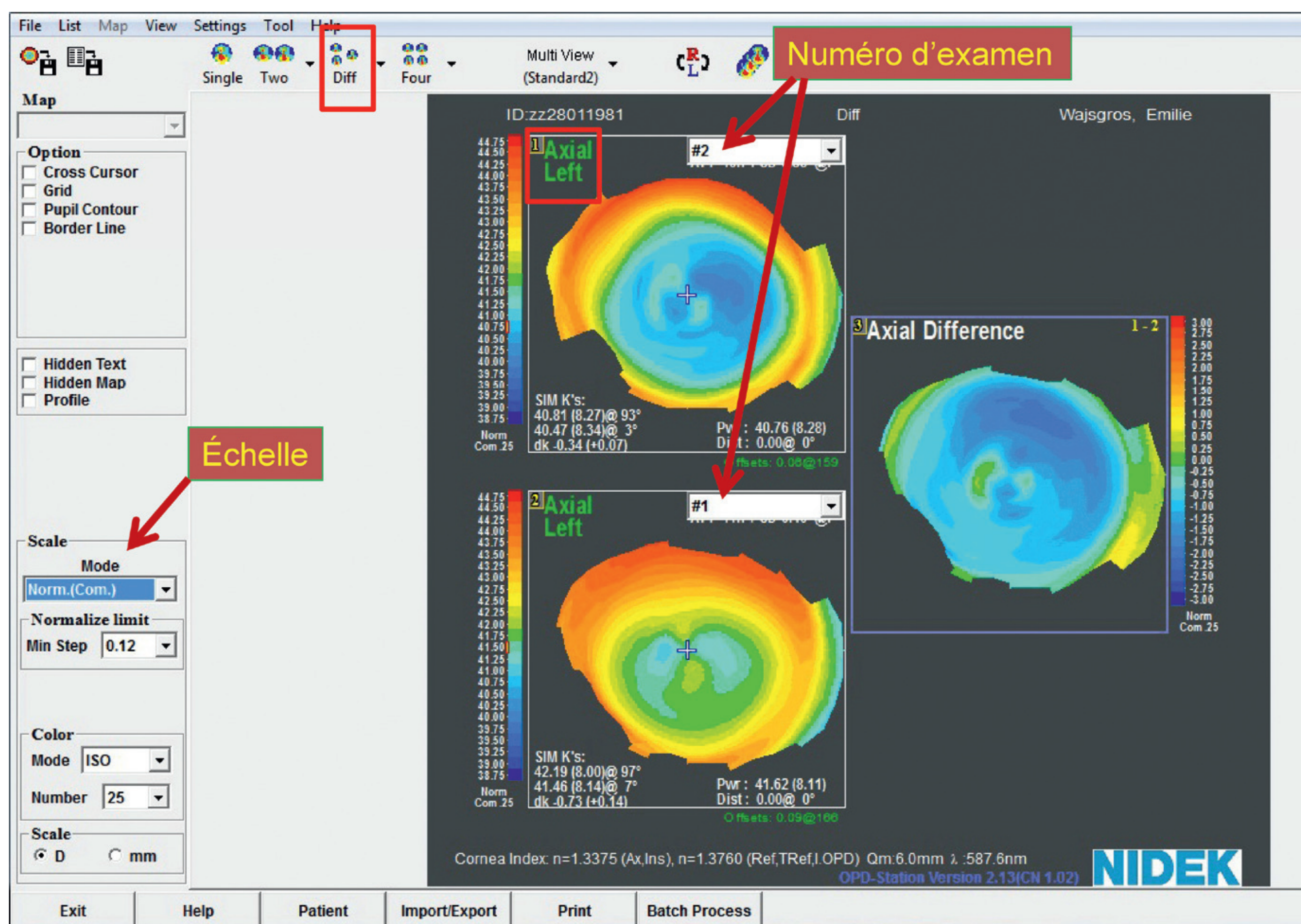



*Fig. 9.1. Carte différentielle en mode axial, effectuée avec le logiciel OPD station (topographe OPDscan). Il faut choisir le menu « Diff », puis le type de carte (ici : courbure axiale), et enfin le type et le pas de l'échelle.*

Le recours aux cartes différentielles permet de comparer de manière objective des examens topographiques réalisés de manière échelonnée dans le temps : les données servant à établir chaque type de carte étant quantifiées, la réalisation d'une carte différentielle revient simplement à effectuer une soustraction entre celles-ci. Le sens de la soustraction peut être fait indifféremment entre l'examen le plus récent et le plus ancien, ou l'inverse (au prix d'un changement de signe).

Quand on cherche à comparer deux examens successifs, il est souvent plus facile de réaliser une carte différentielle que d'observer successivement chacun des examens et y chercher des différences.

La possibilité de réaliser et visualiser une différence entre des examens successifs confère une certaine dimension « dynamique » à la topographie cornéenne, et surtout une valeur diagnostique importante, qui permet de lever certaines incertitudes diagnostiques : trancher entre évolution ou stabilisation d'un kératocône, distinguer entre décentrement et ectasie post-Lasik, etc. La réalisation de cartes différentielles permet d'apporter une réponse objective et illustrée à ces interrogations.

## Obtention d'une carte différentielle

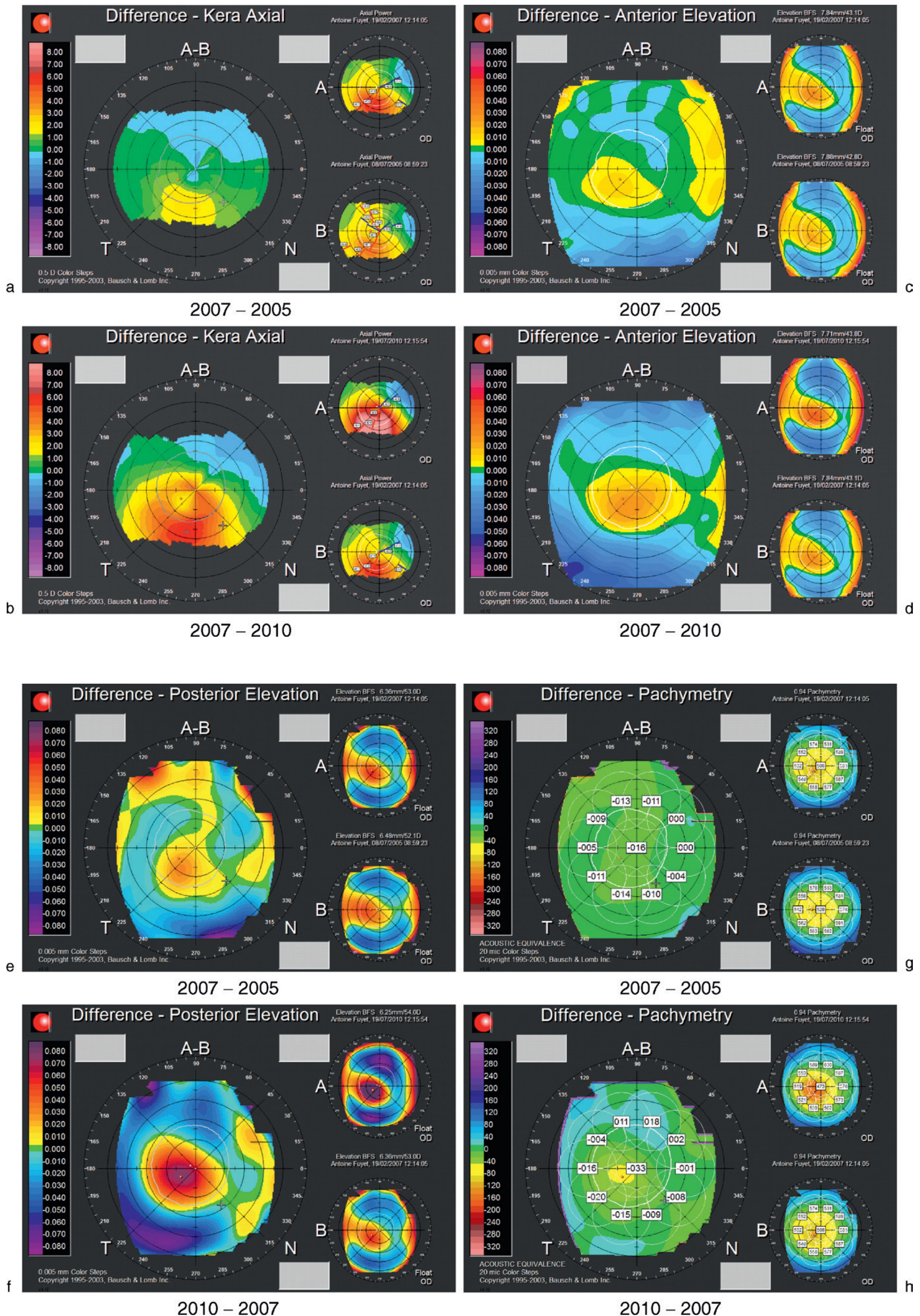
Tous les topographes modernes ont un logiciel qui permet d'effectuer une « différence », ou soustraction, entre deux examens. Généralement, ce calcul est restreint aux cartes obtenues pour un même patient et un côté donné (droit ou gauche), bien que certains topographes permettent de soustraire les cartes de patients et/ou de côtés différents (ex : Orbscan). En revanche, toute réalisation d'une carte différentielle impose naturellement que les deux examens qui vont être utilisés soient du même type (courbure axiale, pachymétrie, élévation, etc.).

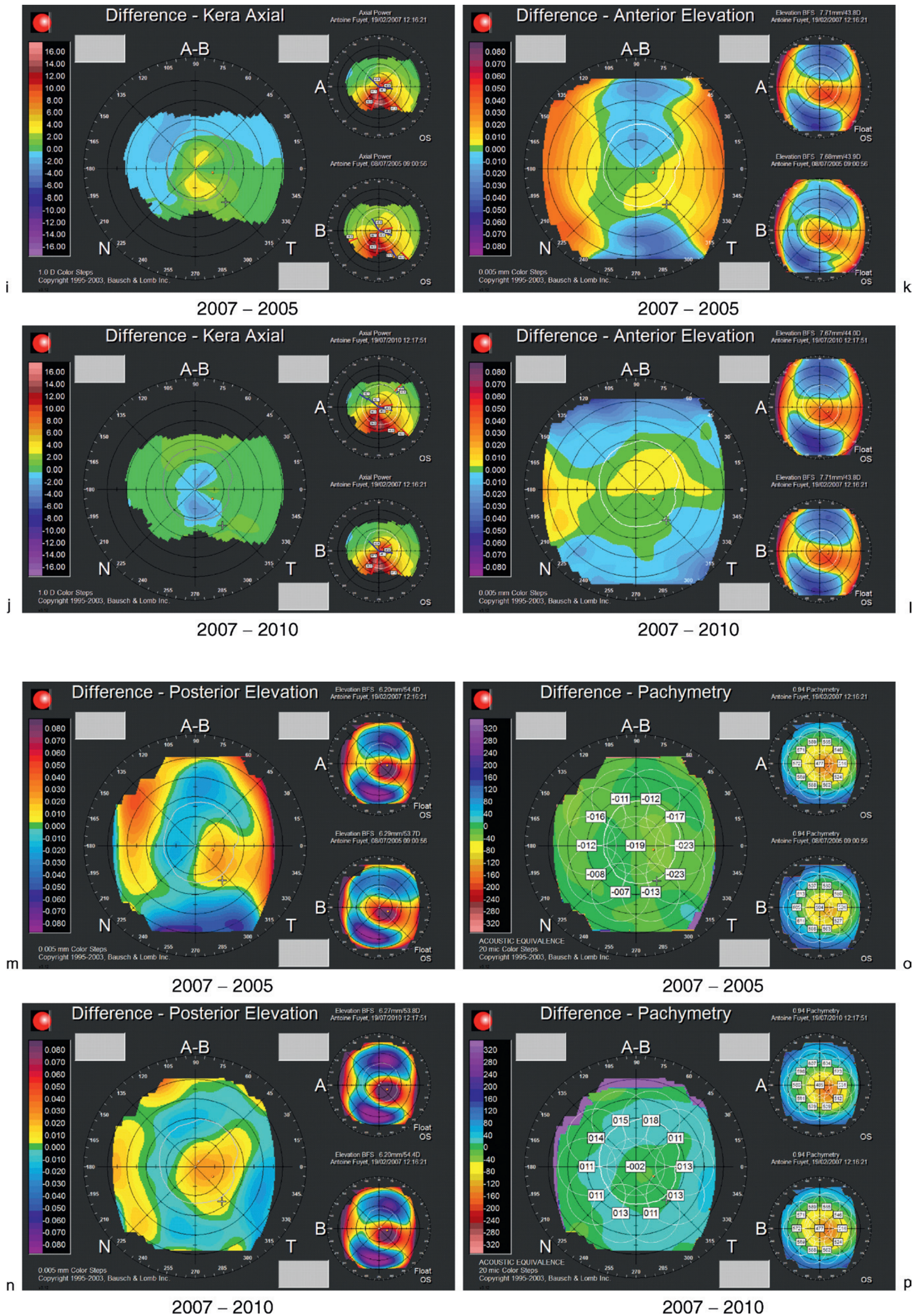
Pour effectuer une différence, il faut en général (Fig. 9.1) :

– sélectionner les examens à comparer (le choix s'effectue selon la date de l'examen) ;

– choisir un « sens » pour la soustraction (ex : plus récent – moins récent) ;

– choisir une échelle pour bien visualiser les différences calculées (cette étape est automatique ou facultative sur certains topographes).


Difference - Kera Axial
A-B
2007 – 2005
Difference - Anterior Elevation
2007 – 2005
Difference - Kera Axial
2007 – 2010
Difference - Anterior Elevation
2007 – 2010
Difference - Posterior Elevation
2007 – 2005
Difference - Pachymetry
2007 – 2005
Difference - Posterior Elevation
2010 – 2007
Difference - Pachymetry
2010 – 2007
a
b
c
d
e
f
g
h


Difference - Kera Axial
A-B
A
B
N
T
OS
1.0 D Color Steps
Copyright 1995-2003, Bausch & Lomb Inc.
i
2007 – 2005
Difference - Anterior Elevation
A-B
Float
0.005 mm Color Steps
k
2007 – 2005
j
2007 – 2010
l
2007 – 2010
Difference - Posterior Elevation
m
2007 – 2005
Difference - Pachymetry
ACOUSTIC EQUIVALENCE
20 mic Color Steps
o
2007 – 2005
n
2007 – 2010
p
2007 – 2010

La soustraction entre les cartes dérivées de l'acquisition de données de courbure, d'élévation ou d'épaisseur est réalisée de manière directe : on obtient finalement une carte où chaque point correspond à une valeur numérique qui est simplement obtenue comme la différence entre les valeurs de chacune des cartes ayant servi à la calculer.

Par exemple, pour les cartes différentielles de courbure, les valeurs dioptriques (dioptries de courbure, kératométrie) sont simplement soustraites, et la différence nette est ensuite tracée à une échelle de pas et d'amplitude appropriée.

Les cartes différentielles sont donc extrêmement utiles pour réaliser des analyses à des temps différents pour une même cornée.

Selon le même principe, les cartes différentielles réalisées entre des cartes issues de données moyennées au sein d'un groupe peuvent s'avérer utiles pour comparer différents groupes de population [1].

Les cartes différentielles issues des données de courbure peuvent être réalisées en mode axial, instantané, ou autre (ex : courbure gaussienne), selon les cas. Le mode axial est particulièrement intéressant pour objectiver une variation de la toricité cornéenne centrale (astigmatisme). Le mode instantané est plus sensible aux variations de l'asphéricité cornéenne et aux variations de courbure périphériques.

Pour être interprétables, les cartes servant pour la différence doivent être correctement alignées et centrées sur un même point. Le vertex est le point utilisé pour les cartes différentielles de courbure issues de la topographie en mode Placido, le centre géométrique de la cornée sert lui à la réalisation de cartes différentielles d'élévation. Comme la topographie d'élévation repose sur le calcul d'une surface de référence, les comparaisons entre différentes cartes doivent être faites avec soin car la valeur d'un point d'élévation est toujours relative à la surface de référence calculée. Le choix du protocole d'ajustement est donc important. En particulier, les comparaisons pré et postopératoires doivent aussi être faites avec soin en raison de la probabilité de références incohérentes et des défauts d'alignement ultérieurs possibles.

# Applications

Voici une liste non exhaustive des principales applications cliniques des cartes différentielles et leur mode de choix :

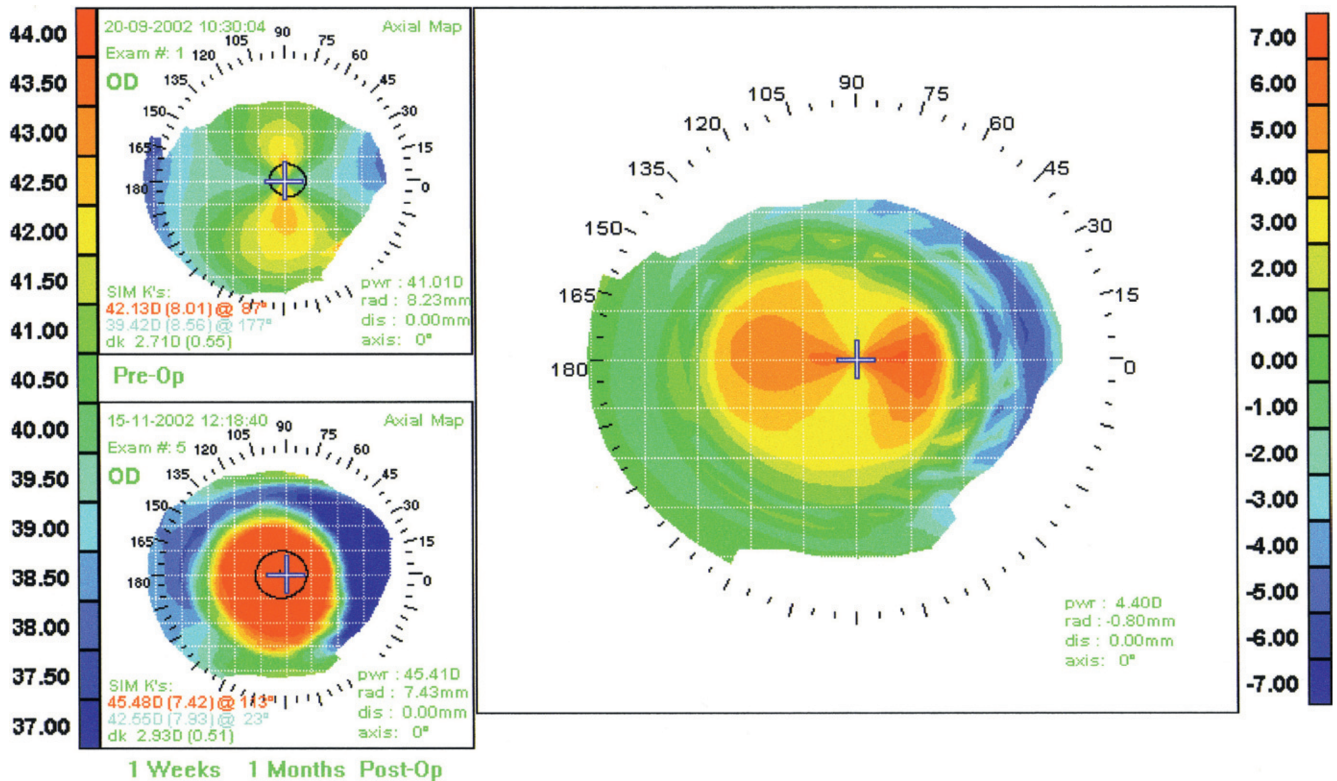
– évaluer la progressivité d'une pathologie ectasiante (kératocône, kératocône fruste) : cartes de courbure axiale, instantanée, cartes de pachymétrie cornéenne sont à même de révéler des modifications qui peuvent être difficiles à visualiser par la simple comparaison visuelle entre deux examens topographiques [2] (Fig. 9.2) ;

– quantifier l'effet d'un traitement photoablatif réfractif standard ou personnalisé (PKR, Lasik) [3, 4] (Fig. 9.3 et 9.4), incisionnel (incisions relaxantes pour correction de l'astigmatisme) (Fig. 9.5), additif (segments

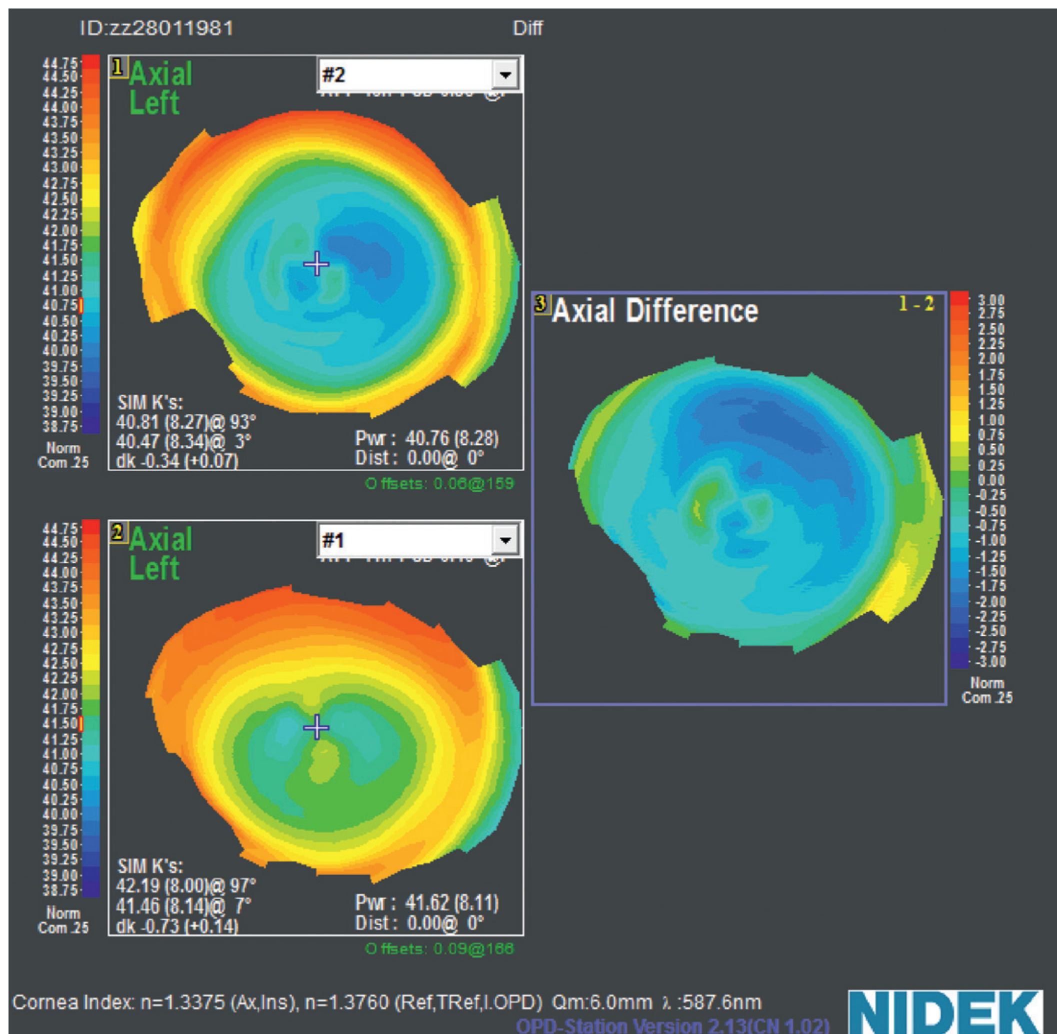
◀ ***Fig. 9.2. On découvre en 2005 grâce à un examen topographique spéculaire et d'élévation (Orbscan) un kératocône bilatéral plus marqué à gauche chez un patient consultant pour baisse d'acuité visuelle et astigmatisme évolutif.***

*Un suivi est effectué, et l'examen topographique effectué en 2007 révèle une progression des deux côtés. Un traitement par photopolymérisation du collagène cornéen par l'action des UVA (ou* crosslinking *du collagène cornéen) est effectué en 2008 sur la cornée gauche. En 2010, on note une stabilisation de l'évolution du kératocône de l'œil gauche, mais une progression de la maladie du côté droit. Les cartes différentielles obtenues par soustraction entre les différentes étapes du suivi sont présentées. Pour chacune, la carte différentielle se situe à gauche ; en haut à droite est représentée une miniature de la carte dont les données « subissent » la soustraction (en bas à droite se situe la carte qui comporte les données soustraites).*

*a. Œil droit : cartes différentielles en mode axial, effectuées entre les cartes réalisées en 2007 et 2005 : noter l'accentuation de l'asymétrie verticale de cambrure (augmentation de la cambrure des hémiméridiens inférieurs) bien soulignée par la carte différentielle : les couleurs les plus chaudes correspondent aux zones dont la cambrure a le plus augmenté. b. Œil droit : cartes différentielles en mode axial, effectuées entre les cartes réalisées en 2010 et 2007 : l'excès relatif de cambrure inférieure est manifeste. La carte différentielle révèle l'induction d'un « astigmatisme topographique » oblique irrégulier. c. Œil droit : cartes différentielles de la surface antérieure en mode élévation, effectuées entre les cartes réalisées en 2007 et 2005 : noter l'augmentation de l'élévation en paracentral temporal inférieur, bien mise en évidence sur la carte différentielle. d. Œil droit : cartes différentielles de la surface antérieure en mode élévation, effectuées entre les cartes réalisées en 2010 et 2007 : évolution similaire en localisation, mais plus marquée en magnitude qu'entre 2005 et 2007. e. Œil droit : cartes différentielles de la surface postérieure en mode élévation, effectuées entre les cartes réalisées en 2007 et 2005 : noter l'accentuation de l'élévation centrale en avant de la Best* Fit Sphere*. f. Œil droit : cartes différentielles de la surface postérieure en mode élévation, effectuées entre les cartes réalisées en 2010 et 2007 : la protrusion de la face postérieure en avant de la BFS semble s'accélérer. g. Œil droit : cartes différentielles de pachymétrie, effectuées entre les cartes réalisées en 2007 et 2005 ; cette carte révèle un amincissement global de la cornée plus marqué dans la région centrale. h. Œil droit : cartes différentielles de pachymétrie, effectuées entre les cartes réalisées en 2010 et 2007 : accentuation de l'amincissement cornéen central. i. Œil gauche : cartes différentielles en mode axial, effectuées entre les cartes réalisées en 2007 et 2005, cette carte différentielle révèle l'accentuation de la toricité cornéenne centrale. j. Œil gauche : cartes différentielles en mode axial, effectuées entre les cartes réalisées en 2010 (*postcross-linking*) et 2007 (*precross-linking*) : l'excès relatif de cambrure inférieure est manifeste. La carte différentielle révèle l'induction d'une réduction de la courbure centrale plus marquée au niveau des méridiens verticaux (réduction de la toricité cornéenne centrale). k. Œil gauche : cartes différentielles de la surface antérieure en mode élévation, effectuées entre les cartes réalisées en 2007 et 2005 : noter l'augmentation de l'élévation en paracentral inférieur, bien mise en évidence sur la carte différentielle. L'aspect de la carte différentielle corrobore l'augmentation de la toricité cornéenne (« recul » des méridiens verticaux et « avancée » des méridiens horizontaux vis-à-vis de la BFS). l. Œil gauche : cartes différentielles de la surface antérieure en mode élévation, effectuées entre les cartes réalisées en 2010 (*postcross-linking*) et 2007 (*precross-linking*) : noter le différentiel d'élévation antérieure plus marquée de l'hémicornée supérieure. m. Œil gauche : cartes différentielles de la surface postérieure en mode élévation, effectuées entre les cartes réalisées en 2007 et 2005 : noter l'accentuation de l'élévation centrale distribuée de manière asymétrique en avant de la Best Fit Sphere dans la zone centrotemporale. n. Œil gauche : cartes différentielles de la surface postérieure en mode élévation, effectuées entre les cartes réalisées en 2010 (*postcross-linking*) et 2007 (*precross-linking*) : la protrusion de la face postérieure en avant de la BFS se poursuit. o. Œil gauche : cartes différentielles de pachymétrie, effectuées entre les cartes réalisées en 2007 et 2005 ; cette carte révèle un amincissement global de la cornée plus marqué dans la région centrale et temporale. p. Œil gauche : cartes différentielles de pachymétrie, effectuées entre les cartes réalisées en 2010 (*postcross-linking*) et 2007 (*precross-linking*) : on note un léger épaississement cornéen paracentral en couronne.*




▶ ***Fig. 9.3.*** *Carte différentielle calculée entre des cartes de courbure axiale effectuées après (en bas à droite) et avant (en haut à gauche) Lasik pour le traitement d'un astigmatisme hypermétropique composé : +2 (+3,50 × 90°).*



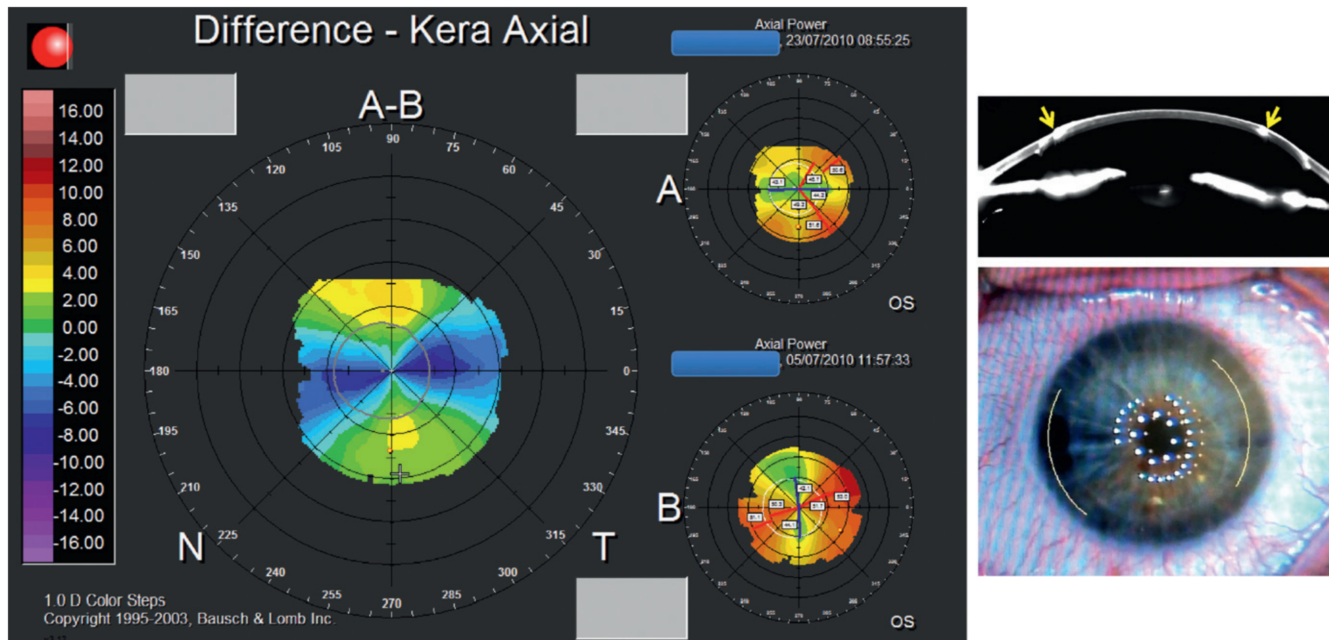



**Fig. 9.5. Carte différentielle en mode axial effectuée entre après (a) et avant (b) la réalisation d'une paire d'incisions intrastromales au laser femtoseconde (en bas à droite) pour réduire un astigmatisme de 8 dioptries lié à une toricité excessive d'un greffon cornéen (en haut à droite : les flèches montrent l'emplacement des incisions).**
*La carte différentielle révèle la magnitude du changement de la toricité cornéenne : une réduction de la cambrure est survenue dans l'axe des incisions (environ 7 dioptries) et un effet de couple biomécanique (classique en chirurgie incisionnelle) a induit une augmentation de la cambrure pour les méridiens orientés perpendiculairement vis-à-vis de cet axe.*

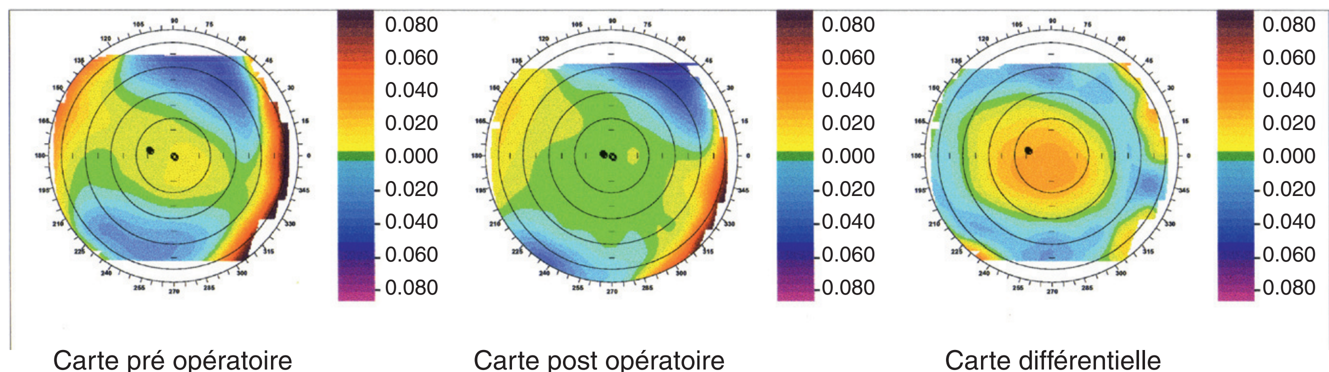



**Fig. 9.6. Carte différentielle d'élévation (Orbscan) effectuée entre les cartes pré et postopératoire chez un patient opéré de Lasik myopique.**
*La répartition du différentiel d'élévation indique une réduction de l'épaisseur cornéenne centrale de l'ordre de 30 µm.*

intracornéens) : les cartes de courbure axiales sont les plus pertinentes pour révéler la modification de la toricité cornéenne. Les cartes d'élévation permettent de visualiser les modifications spatiales induites par le traitement photoablatif (Fig. 9.6) ;

– évaluer l'effet de l'ablation de points de suture (Fig. 9.7) ;

– suivre dans le temps des phénomènes cicatriciels, inflammatoires, dégénératifs intéressant la surface cornéenne : cartes de courbure (axiale et instantanée) (Fig. 9.8), cartes pachymétriques [5] ;

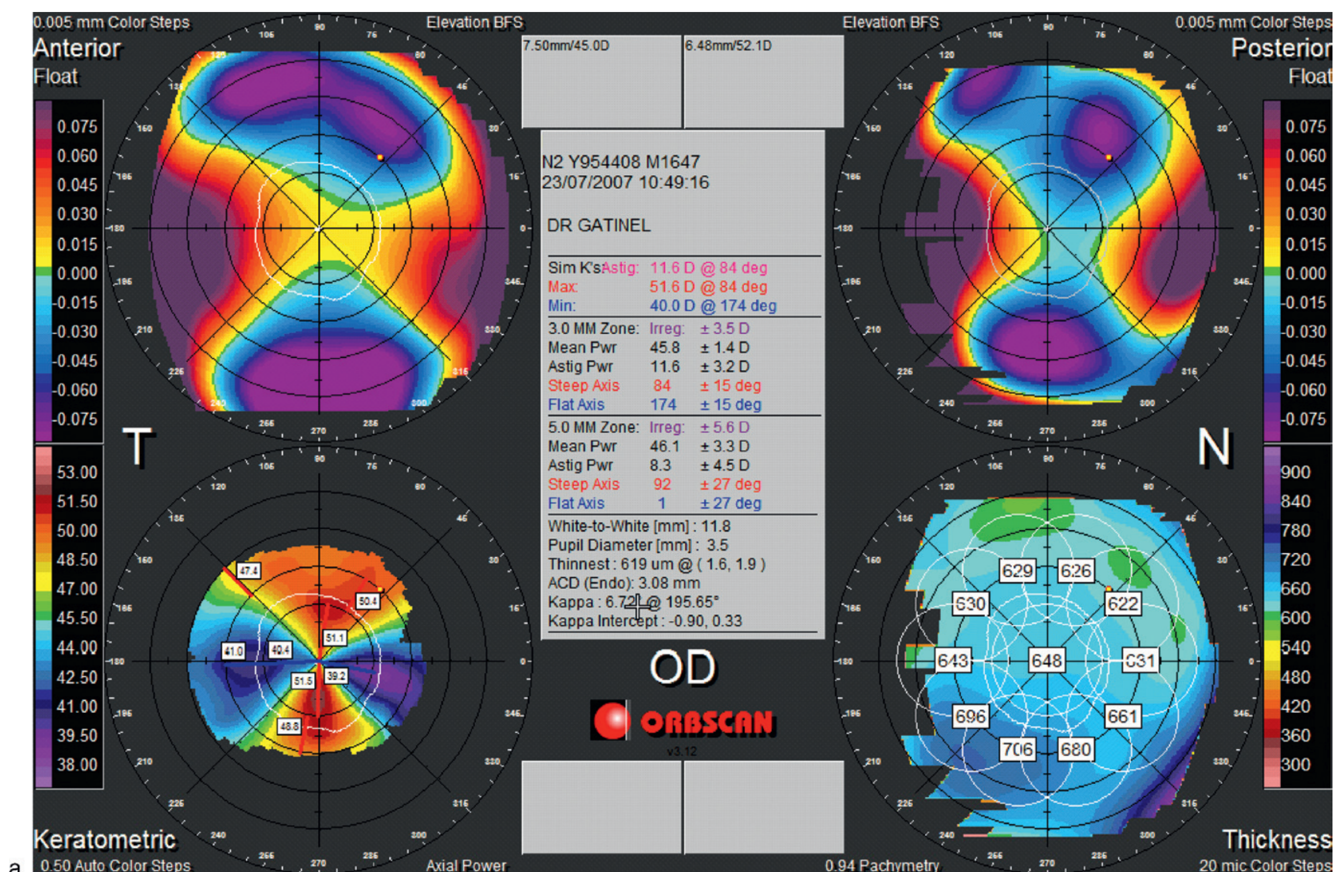
– effectuer le diagnostic différentiel entre une ectasie post-Lasik et un décentrement (la constatation d'une accentuation de l'asymétrie caractérise l'évolution d'une kératectasie) ou un astigmatisme induit (l'augmentation progressive d'un astigmatisme irrégulier après Lasik doit faire éliminer une ectasie induite) (Fig. 9.9) ;

– évaluer l'effet d'une incision cornéenne en chirurgie de la cataracte [6, 7] : cartes de courbure axiale pour la recherche d'une modification de la toricité cornéenne. L'induction d'un aplatissement périphérique en regard de l'incision est souvent mieux perçue en représentation de la courbure instantanée ;

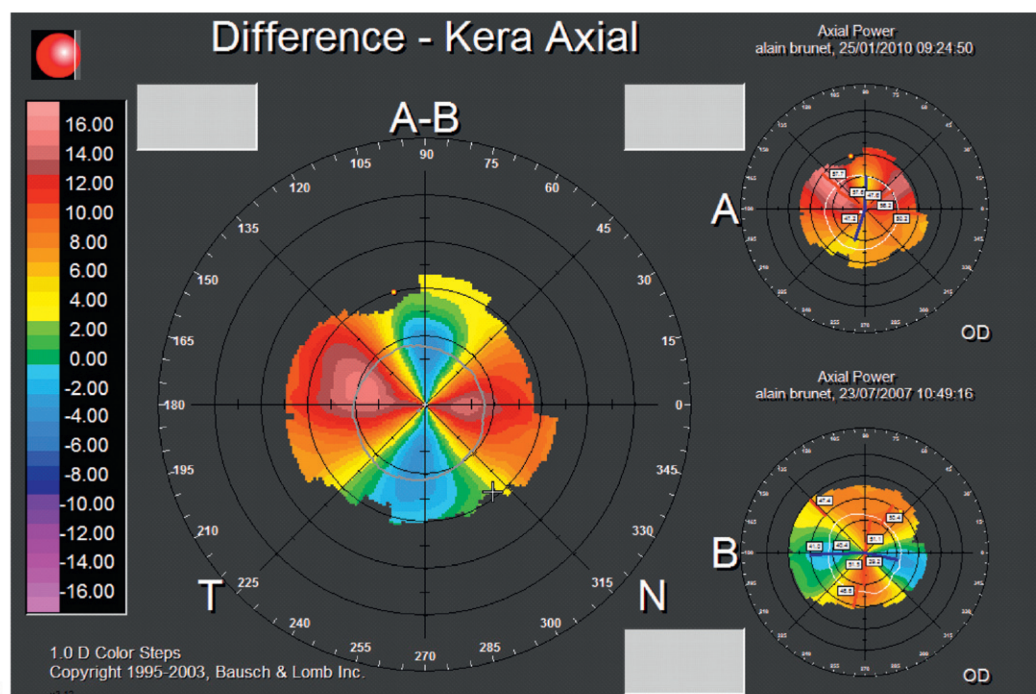
– étudier les modifications topographiques provoquées par la chirurgie cornéenne [8, 9] ;

– objectiver la réduction d'un *corneal warpage* après interruption du port de lentilles rigides perméables à l'oxygène.

◄ **Fig. 9.4. Carte différentielle de courbure axiale (œil gauche) effectuée entre une carte effectuée avant (# 1) et après (# 2) délivrance d'une photoablation cornéenne personnalisée guidée par la topographie cornéenne pour traiter un décentrement inférieur (Lasik myopique).**
*La carte différentielle met en évidence la réduction globale de la cambrure de la surface cornéenne plus marquée en supérieur, induite par le profil d'ablation utilisé pour le retraitement.*



a



b

**Fig. 9.7.** ***Carte spéculaire et d'élévation (Orbscan) chez un patient opéré de kératoplastie transfixiante 1 an plus tôt.***
*a. Il existe un important astigmatisme direct d'origine cornéenne (10 dioptries), lié à une toricité importante du greffon. Noter le parallélisme entre la distribution des cartes d'élévation antérieure et postérieure, fréquemment observée au niveau des topographies post-greffe. Les sutures consistent en 16 points de nylon séparés. Les retraits successifs de 4 points en supérieur et de 3 points en inférieur sont effectués sur une période de 16 mois. b. Après retrait de 7 points, il persiste un astigmatisme inverse de 6 dioptries. La carte différentielle en mode axial révèle un changement important de la toricité cornéenne antérieure. Les zones bleues (couleurs froides) ont subi une réduction de cambrure, les zones rouges (couleurs chaudes) une augmentation de cambrure. Ainsi, la décambrure des méridiens d'orientation verticale engendrée par l'ablation des points est de l'ordre de 4 dioptries, mais un effet de couple a provoqué une augmentation de la cambrure des méridiens horizontaux d'environ 12 dioptries. La carte différentielle montre le « cylindre induit », dont l'amplitude est d'environ 16 dioptries.*

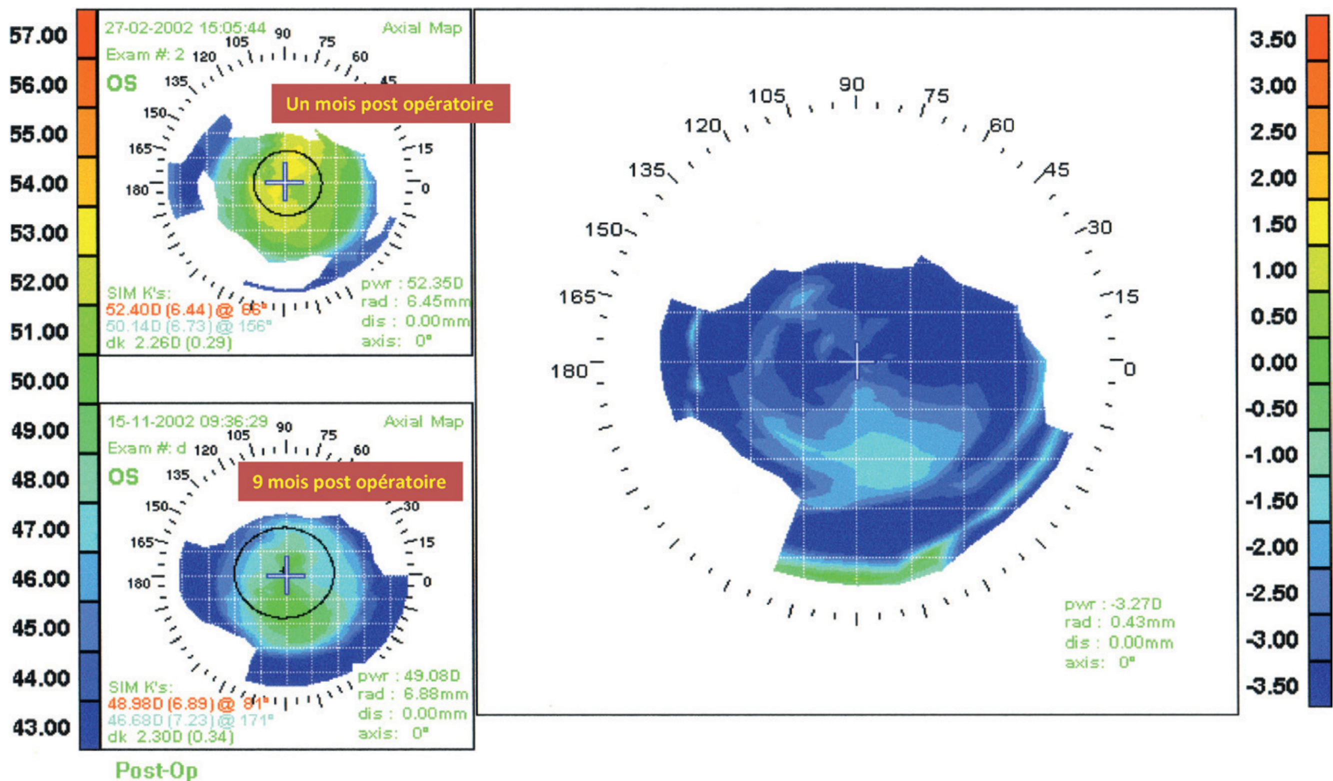



**Fig. 9.8. Carte différentielle de courbure axiale chez un patient opéré de Lasik hypermétropique, et présentant une régression de l'effet réfractif initial induit par la chirurgie.**
*La soustraction entre l'examen postopératoire de 9 mois et l'examen postopératoire de 2 mois révèle la réduction de courbure axiale globale de la surface cornéenne (couleurs froides : réduction de la puissance kératométrique). Cette variation est liée aux phénomènes de remodelage stromal et épithélial. À l'inverse, l'absence de modifications notables de la kératométrie chez un patient opéré malgré la présence de changements réfractifs significatifs peut traduire la présence d'une modification de la puissance cristallinienne (exemple : myopisation d'indice tardive chez un patient opéré de chirurgie réfractive cornéenne).*

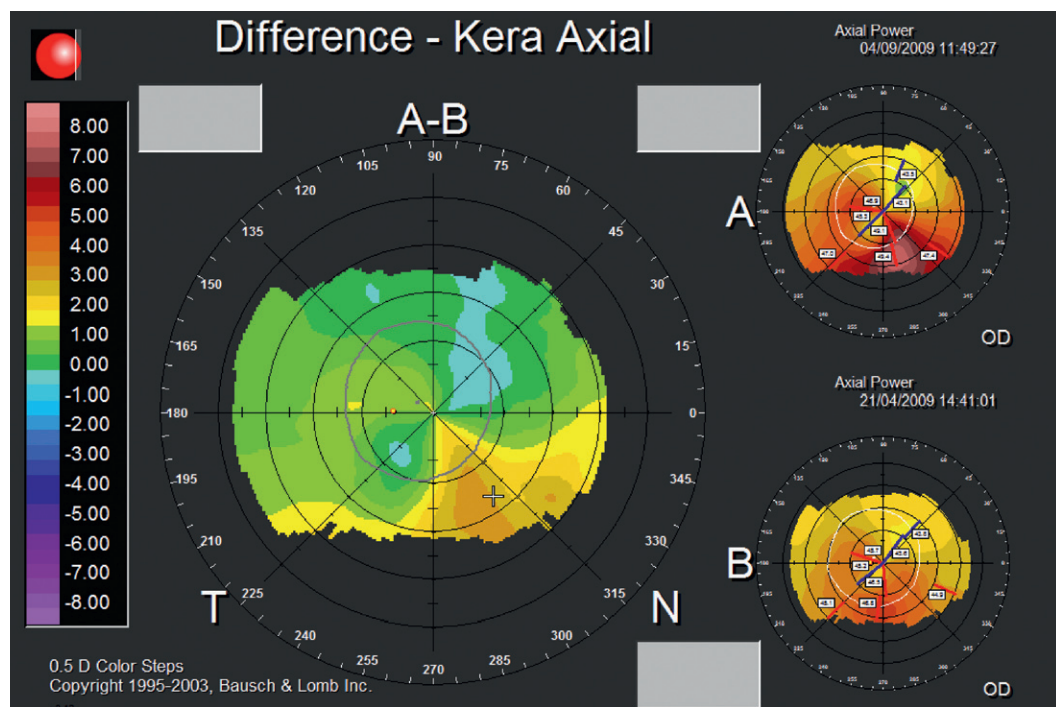



**Fig. 9.9. Carte différentielle (œil droit) entre deux cartes de courbure axiale effectuées à 5 mois d'intervalle.**
*Le patient avait été opéré un mois plus tôt de Lasik pour un astigmatisme myopique composé. Un astigmatisme résiduel réfractif (–2 × 45°) est noté en postopératoire. Noter l'aspect irrégulier de la toricité cornéenne (B), qui s'accentue au fil du temps (A). La carte différentielle montre l'accentuation de la cambrure en inférieur : cet aspect confirme la présence d'une pathologie ectasiante et contre-indique la réalisation d'une photoablation secondaire.*

Le recours aux cartes différentielles est utile dans bien des circonstances cliniques ; il permet au praticien d'objectiver directement et avec précision les variations induites au niveau de la topographie cornéenne par un phénomène physiopathologique, ou un acte chirurgical.

**Références**

[1] Laliberté JF, Meunier J, Chagnon M, Kieffer JC, Brunette I. Construction of a 3-D atlas of corneal shape. Invest Ophthalmol Vis Sci 2007 ; 48 (3) : 1072–8.
[2] Johnson JD, Azar DT. Surgically induced topographical abnormalities after Lasik : management of central islands, corneal ectasia, decentration, and irregular astigmatism. Curr Opin Ophthalmol 2001 ; 12 (4) : 309–17.
[3] Serrao S, Lombardo G, Lombardo M, Palombi M, Roberts CJ. Corneal topography six years after photorefractive keratectomy for myopia and myopic astigmatism. J Refract Surg 2009 ; 25 (5) : 451–8.
[4] Gatinel D, Bains HS. Treatment of Highly Aberrated Eyes Using the NIDEK CXIII Excimer Laser. J Refract Surg 2010 ; 25 : 1–5.
[5] Zhuang H, Zhou X, Xu J. A novel method for pachymetry mapping of human precorneal tear film using Pentacam with fluorescein. Invest Ophthalmol Vis Sci 2010 ; 51 (1) : 156–9.
[6] Hayashi K, Yoshida M, Hayashi H. Corneal shape changes after 2.0-mm or 3.0-mm clear corneal versus scleral tunnel incision cataract surgery. Ophthalmology 2010 ; 117 (7) : 1313–23.
[7] Hayashi K, Yoshida M, Hayashi H. Postoperative corneal shape changes : microincision versus small-incision coaxial cataract surgery. J Cataract Refract Surg 2009 ; 35 (2) : 233–9.
[8] Lombardo M, Terry MA, Lombardo G, Serrao S, Ducoli P. Investigation of corneal topography after deep lamellar endothelial keratoplasty. Eur J Ophthalmol 2010 ; in press.
[9] Koller T, Iseli HP, Hafezi F, Vinciguerra P, Seiler T. Scheimpflug imaging of corneas after collagen cross-linking. Cornea 2009 ; 28 (5) : 510–5.

Chapitre 10

# *Diagnostic positif et différentiel des asymétries cornéennes pathologiques*

*Kératocône fruste*

*Dégénérescence marginale pellucide*

Corneal warpage *: déformation induite par les lentilles de contact*

*Ectasie cornéenne induite par le Lasik (kératectasie)*

*Topographie cornéenne*

L'objet principal de cet ouvrage est de fournir une méthode d'interprétation des cartes en topographie cornéenne, et non de rassembler en un atlas l'ensemble des aspects topographiques rencontrés en pathologie cornéenne. Les fondamentaux nécessaires à une bonne compréhension des techniques de recueil et d'interprétation ont été rapportés dans les chapitres précédents, et ils ont été illustrés par divers exemples cliniques. Certains aspects liés à l'existence d'une asymétrie cornéenne méritent une mention particulière en raison de leur importance et/ou présentation topographique parfois trompeuse : ils font l'objet de ce chapitre.

## Kératocône fruste

Cette forme de kératocône infraclinique, baptisée « forme fruste » par Amsler en 1961 [1], peut être définie comme un état cliniquement silencieux, qui partage certains

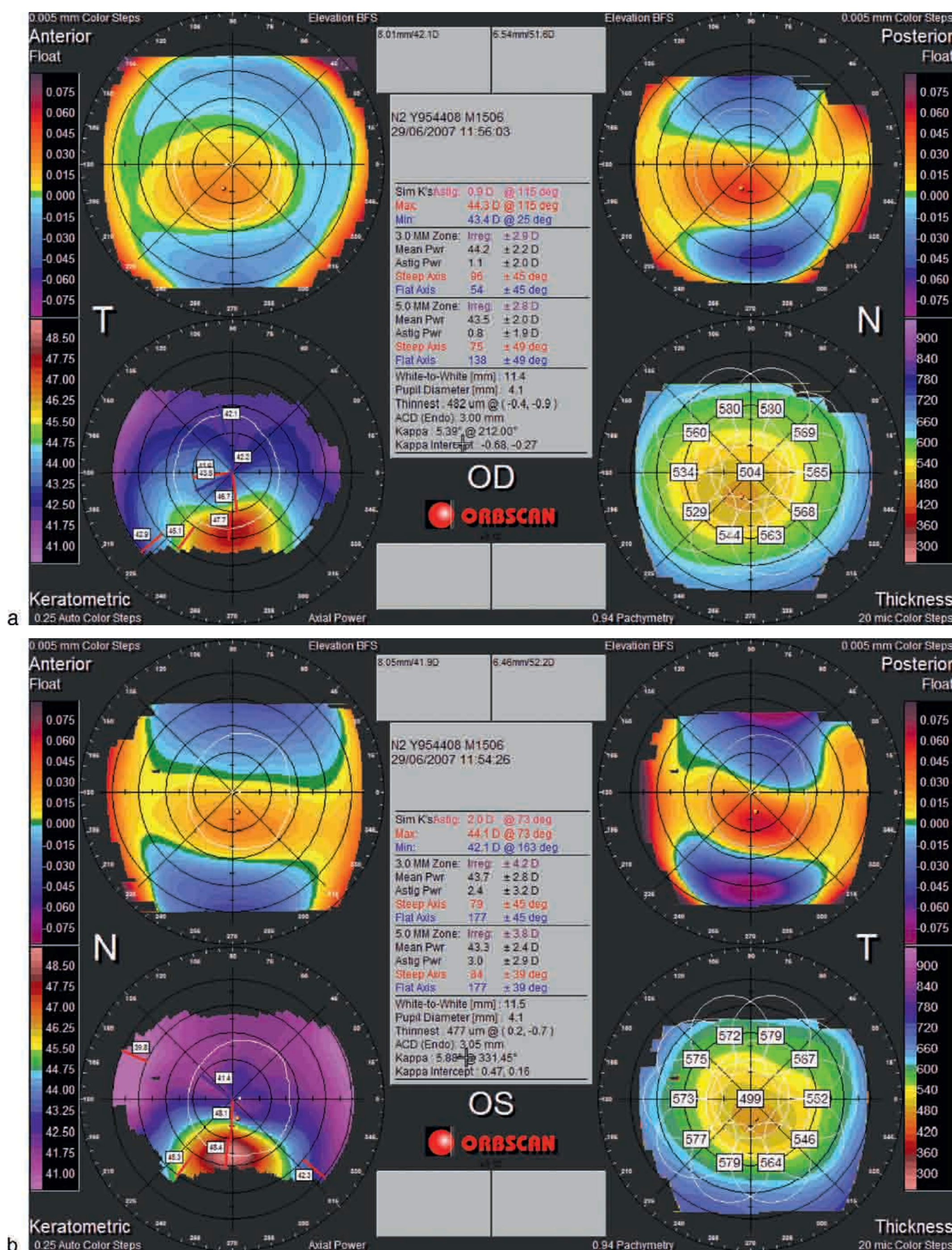



**Fig. 10.1.** ***Kératocône bilatéral chez un homme myope et astigmate de 29 ans, sans perte de la meilleure acuité visuelle corrigée : les cartes topographiques spéculaires ont été représentées avec une échelle personnalisée.***
*a. Œil droit : la carte en mode axial (en bas à gauche) montre un kératocône dont l'apex (en courbure axiale) est assez inférieur. On remarque également le déplacement inféro-temporal du point le plus fin sur la carte d'épaisseur (en bas à droite), et l'élévation positive accrue et décalée en inférieur sur les cartes d'élévation. b. Œil gauche : aspects similaires mais légèrement plus prononcés que du côté de l'œil droit.*

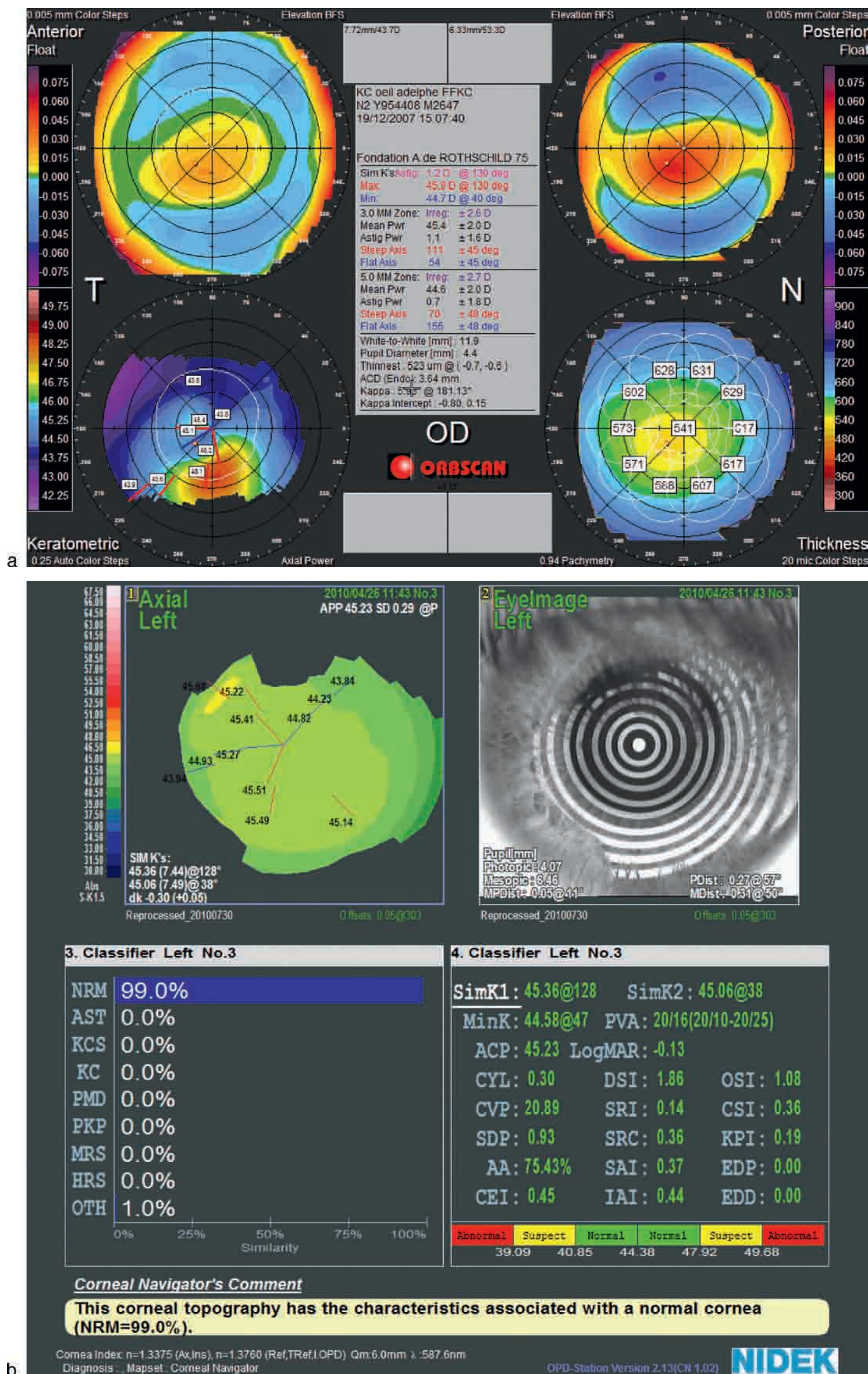
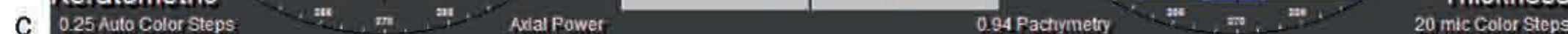



**Fig. 10.2. *Kératocône d'évolution très asymétrique entre l'œil droit et l'œil gauche d'un homme de 27 ans, dont le frère est atteint de kératocône bilatéral (cartes présentées Fig. 10.1).***

*a. Malgré une épaisseur centrale moyenne non diminuée, on retrouve un amincissement temporal inférieur rapide (point le plus fin décentré en temporal inférieur). b. Analyse en topographie spéculaire (topographe OPDscan, Nidek) de la cornée de l'œil gauche : la carte de courbure axiale est représentée avec l'échelle de Klyce et Maeda. Il existe une légère irrégularité au niveau de la carte de courbure axiale mais le degré de celle-ci est en deçà des seuils de détection comme le montrent les valeurs calculées pour les différents indices de détection* (Classifier)*.*




▸ ***Fig. 10.2.*** *(Suite).*
*c. On retrouve sur la carte Orbscan en mode Quad Map de la cornée gauche une légère irrégularité de la carte de courbure axiale (en bas à gauche). Malgré un angle kappa standard, le point le plus fin est excentré et la différence entre la pachymétrie moyenne centrale et le point le plus fin (thinnest point) est égale à 16 µm. Il existe une élévation accrue au niveau de la face postérieure, en regard de la zone d'amincissement et maximale vers le point le plus fin. Indépendamment du contexte, la conjonction de ces trois caractéristiques doit faire évoquer la possibilité d'une forme fruste de kératocône.*

traits topographiques avec le kératocône avéré dont une asymétrie topographique d'expression variable, qu'elle soit présente au sein d'une carte isolée, ou corresponde à la présence d'un faible énantiomorphisme (absence de symétrie en miroir entre les deux yeux). Les traits évocateurs de kératocône sont très estompés, mais ils peuvent être précurseurs et suivis d'une accentuation révélant une évolution plus franche vers la maladie, ou demeurer stables dans le temps [2, 3]. Ils se rencontrent alors chez des adultes dans leur $3^{e}$, $4^{e}$ ou $5^{e}$ décennie, de manière fortuite, ou à l'occasion d'un bilan systématique : bilan avant chirurgie réfractive [4], bilan chez des parents atteints de formes avérées [5, 6].

Dans un souci de clarté et de cohérence historique, nous avons proposé récemment de restreindre le terme « kératocône fruste » aux kératocônes infracliniques qui ne sont pas détectables en topographie spéculaire de Placido seule (surface antérieure seule), mais seulement après inspection des cartes d'élévation postérieure et pachymétrique [7]. Les formes où l'on retrouve une expression de la maladie détectable au niveau de la face antérieure (formes « Placido détectables » selon les critères validés et définis par Rabinowitz, ou Klyce et Maeda) [8, 9] sont définies par ces mêmes auteurs comme des formes « suspectes ». Dans ces formes (*a priori* plus avancées que les formes « frustes »), on retrouve bien sûr également des modifications d'épaisseur et de topographie postérieure [10].

En plus des formes familiales, on retrouve l'association avec certaines pathologies comme l'allergie (terrain atopique) et les frottements digitaux répétés [11] à la fois pour le kératocône infraclinique et le kératocône avéré, ce qui renforce l'idée que le kératocône fruste même stable correspond à une pathologie apparentée au kératocône mais d'expression topographique mineure. Les cartes topographiques rapportées dans les Fig. 10.1 et 10.2 correspondent à des formes de kératocône de stades variables observés chez deux frères, dont l'un présente un kératocône avéré bilatéral, l'autre un kératocône avéré unilatéral si l'on s'en tient aux seuls critères topographiques spéculaires de Klyce et Maeda.

L'inspection attentive des relevés d'élévation et de pachymétrie cornéenne issus de l'œil non dépisté par l'examen spéculaire seul est instructive, car ceux-ci contiennent potentiellement les signes les plus précoces de kératocône infraclinique (forme fruste).

Si le kératocône fruste (et les formes infracliniques apparentées) peut faire l'objet d'un débat sémantique, il est une certitude : la présence d'une forme infraclinique de kératocône contre-indique formellement la réalisation d'un Lasik [11–13]. Le dépistage du kératocône fruste (infraclinique) est essentiel et motive la réalisation systématique d'une topographie cornéenne en préopératoire. L'étude rétrospective de cas d'ectasie post-Lasik est d'ailleurs instructive car elle permet de retrouver dans la plupart des cas des aspects topographiques évocateurs de forme fruste ou suspecte pour le kératocône [14–17]. On retrouve également ces aspects au niveau de la cornée la moins atteinte chez les patients atteints de formes très « asymétriques » de kératocône (parfois même jugées « unilatérales », topographiquement du moins). L'étude approfondie des cartes issues de ces cornées « génétiquement atteintes » mais « phénotypiquement » très discrètes est instructive [7, 18–24] (Fig. 10.3). Afin d'éliminer

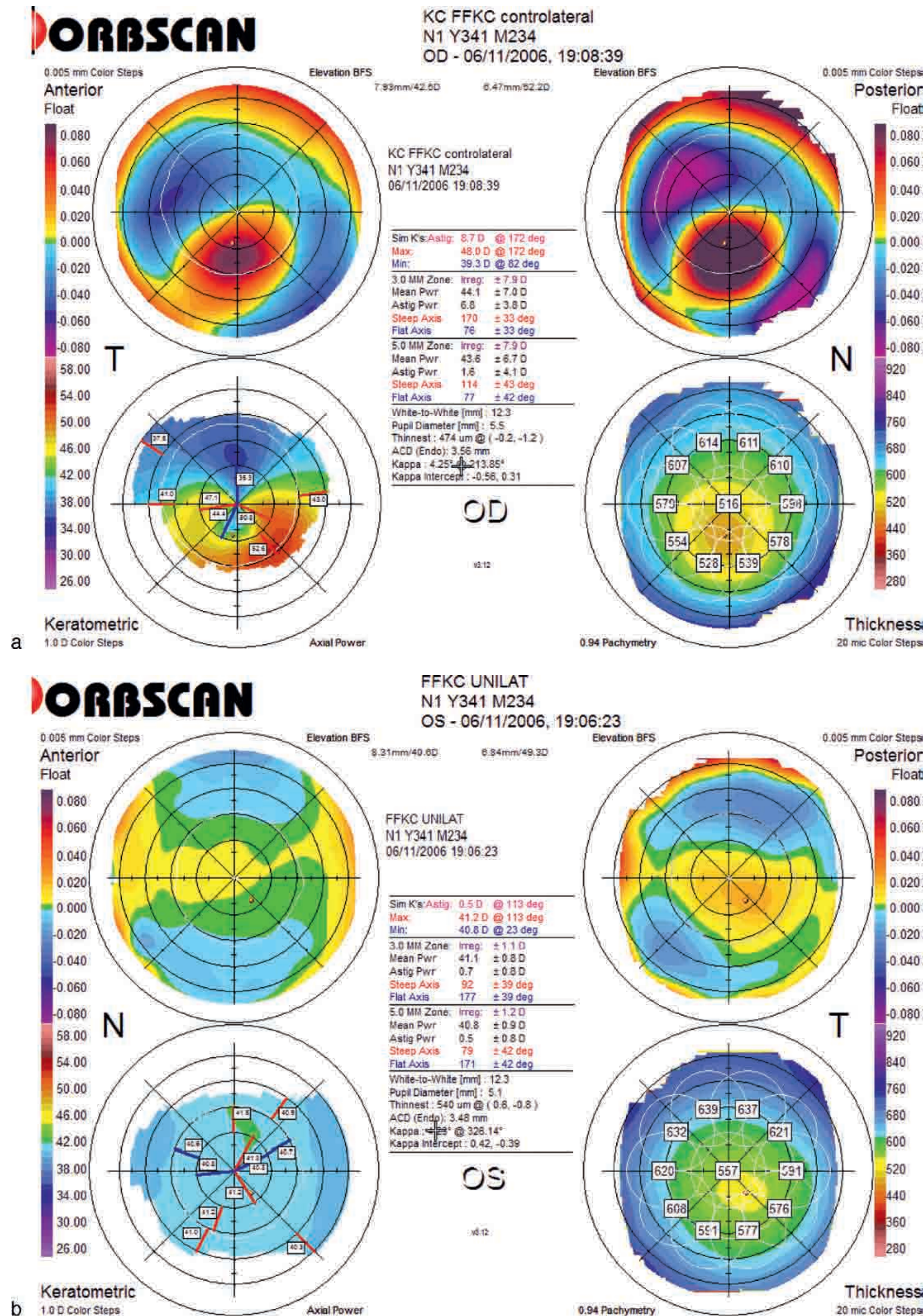



**Fig. 10.3.** *Exemple de cartes Orbscan (mode* Quad Map*) effectuées chez un patient de 20 ans atteint d'une forme très asymétrique de kératocône.*

*a. La déformation induite par le kératocône est très prononcée et affecte les cartes d'élévation et de courbure. Noter l'amincissement paracentral inférieur en regard de la zone d'élévation maximale postérieure, la présence d'un certain parallélisme entre les faces antérieure et postérieure. b. L'étude attentive des cartes topographiques de l'œil controlatéral est instructive ; malgré l'absence d'anomalies manifestes au niveau de la courbure axiale antérieure : kératométrie moyenne proche de 41 D, et absence de toricité majeure et d'asymétrie manifeste. L'analyse par les indices de Klyce et Maeda est négative (absence de suspicion de kératocône). La carte d'élévation antérieure révèle une géométrie antérieure proche de celle d'une sphère (noter la faible dispersion de l'élévation autour du niveau de la sphère de référence calculée). L'aspect en promontoire est centré et symétrique. La carte d'élévation postérieure révèle en revanche un décalage inférotemporal de l'îlot central d'élévation positive ; la zone d'élévation positive maximale est en regard du point le plus fin (*thinnest point*), lui-même excentré dans la même direction (l'angle kappa est inférieur à 5°). La différence entre l'épaisseur moyenne centrale et celle du point le plus fin est estimée à 17 µm. Cet exemple clinique suggère que les manifestations topographiques les plus précoces du kératocône infraclinique siègent au niveau de la carte d'épaisseur, et que les modifications de la distribution pachymétrique (réduction de l'épaisseur en temporal inférieur) impactent plus fortement la topographie postérieure que la topographie antérieure. Ce cas illustre le fait que l'utilisation d'indices topographiques extraits de ces données pachymétriques et postérieures accroisse la sensibilité et la spécificité du dépistage du kératocône infraclinique.*

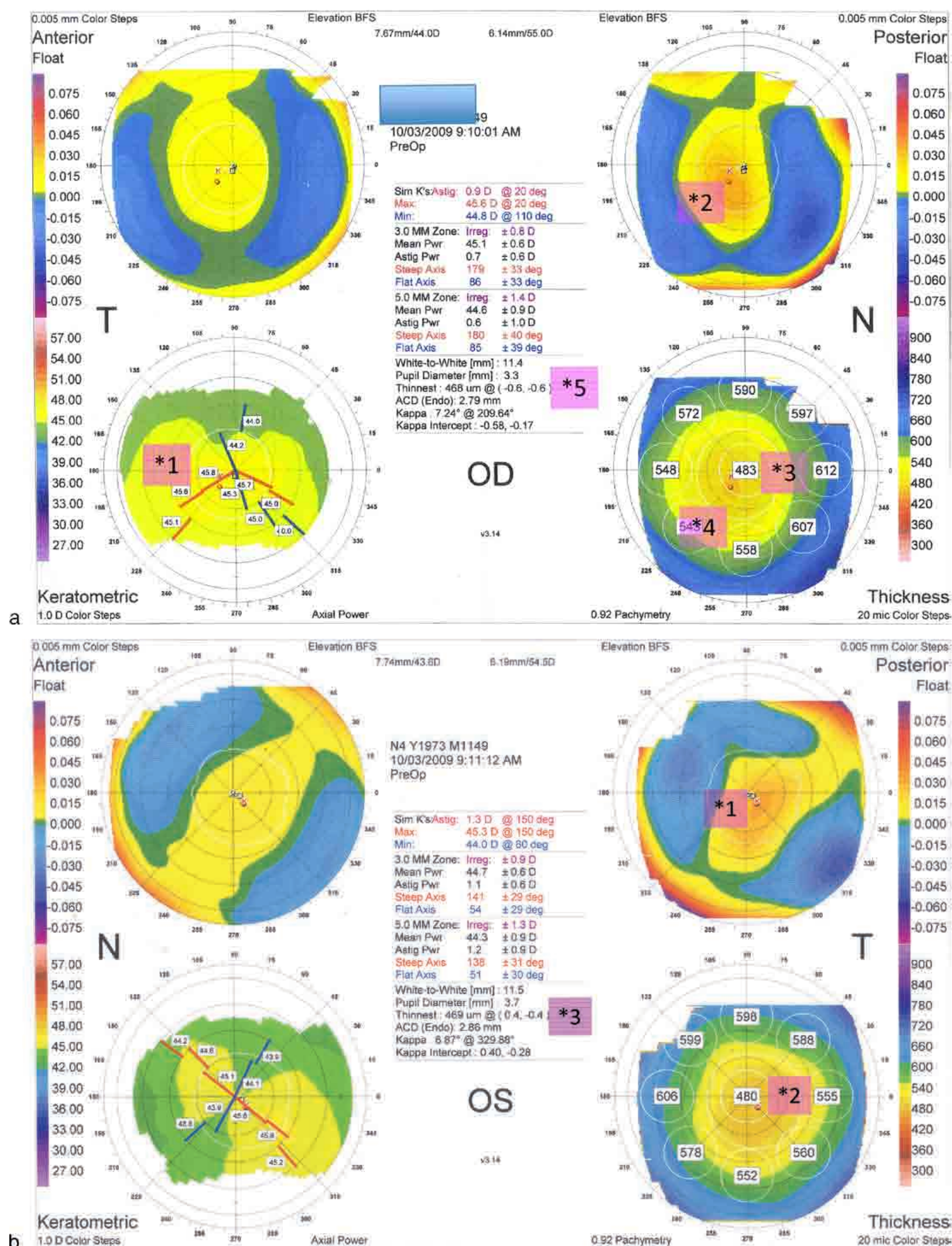



**Fig. 10.4.** ***Cartes topographiques Orbscan (mode* Quad Map*) obtenues chez une patiente de 37 ans sans antécédentes remarquables en dehors d'un terrain atopique (rhinites allergiques, asthme) et qui consultait en vue de la correction chirurgicale d'une myopie moyenne.***

*La topographie spéculaire est jugée normale (critères de Klyce et Maeda négatifs pour le kératocône avéré ou suspect). Les cartes Orbscan en mode Quad Map révèlent plusieurs indices évocateurs d'une forme suspecte de kératocône. En premier lieu, il existe un faible énantiomorphisme global (faible symétrie en miroir entre l'œil droit et l'œil gauche). a. Œil droit : *1 = aspect de SRAX en mode de courbure axiale. Noter l'échelle relativement large, masquant la présence possible d'anomalies de courbure en inférieur, même si la toricité de la cornée est faible, et si la carte d'élévation antérieure (en haut à gauche) révèle une faible disparité avec le niveau de la sphère de référence; *2 = sur la carte d'élévation postérieure, accentuation de l'élévation au-dessus de la sphère de référence (l'échelle colorimétrique permet d'estimer celle-ci à au moins 35 µm); *3 = épaisseur centrale moyenne inférieure à 490 µm; *4 : déplacement du point le plus fin en temporal inférieur (l'excursion inférieure est supérieure à 0,5 mm, alors que la composante horizontale du déplacement est liée en partie à la présence d'un angle kappa supérieur à 7°); *5 = différence d'épaisseur entre la pachymétrie centrale et celle du point le plus fin (thinnest point) égale à 15 µm. b. Œil gauche : *1 = accentuation de l'élévation au-dessus de la sphère de référence (l'échelle colorimétrique permet d'estimer celle-ci à au moins 35 µm); *2 = épaisseur centrale moyenne inférieure à 490 µm; *3 = différence d'épaisseur entre la pachymétrie centrale et celle du point le plus fin (thinnest point) égale à 15 µm (dans notre expérience, une différence supérieure à 11 µm peut être considérée comme suspecte).*

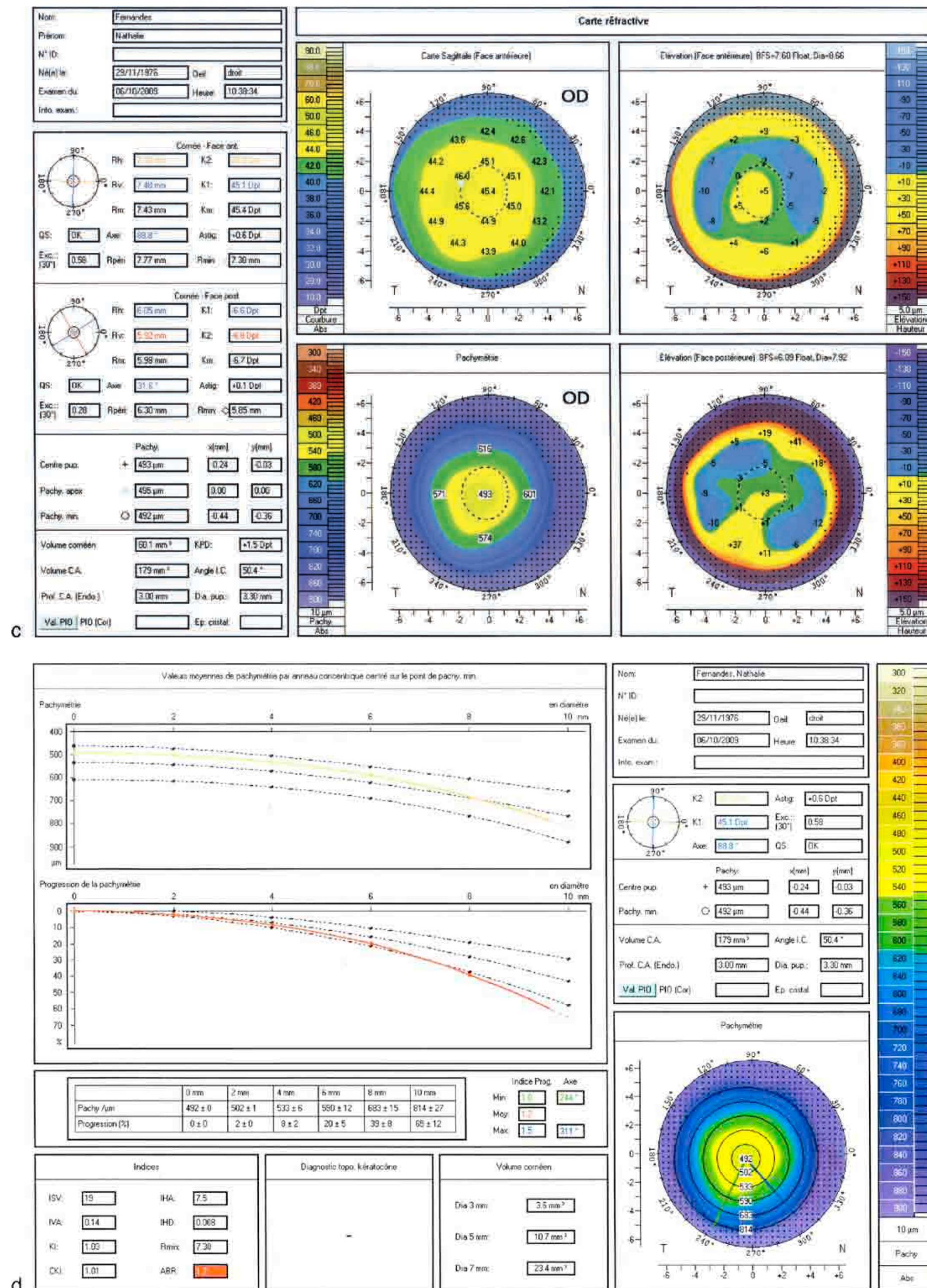



**Fig. 10.4.** *(Suite).*

*c. Un examen Pentacam est également réalisé chez cette patiente : le relevé de l'œil droit présente un aspect global similaire à celui présenté sur les cartes Orbscan. Les différences sont liées à divers facteurs comme l'algorithme utilisé pour le* fitting *de la sphère de référence, et les échelles colorimétriques qui sont spécifiques à chaque instrument. Noter que comme pour les cartes Orbscan, l'échelle colorimétrique choisie pour la carte axiale est trop large et provoque un rendu uniforme (avec le Pentacam, dépourvu de disque de Placido, cette carte présente des données de courbure calculées à partir des données fournies d'élévation). d. Œil droit (suite) : la carte de profil pachymétrique (courbe jaune, en haut) suggère un amincissement central rapide. Cette tendance est confirmée par l'étude de la carte de progression de la pachymétrie (en rouge, au milieu) qui confirme la progression trop rapide des variations de l'épaisseur cornéenne entre le point le plus fin et la périphérie cornéenne. Noter la valeur anormale de l'indice ABR, calculé à partir de la décomposition du relief cornéen antérieur en aberrations optiques (polynômes de Zernike), et suggérant la présence d'un certain degré d'irrégularités.*

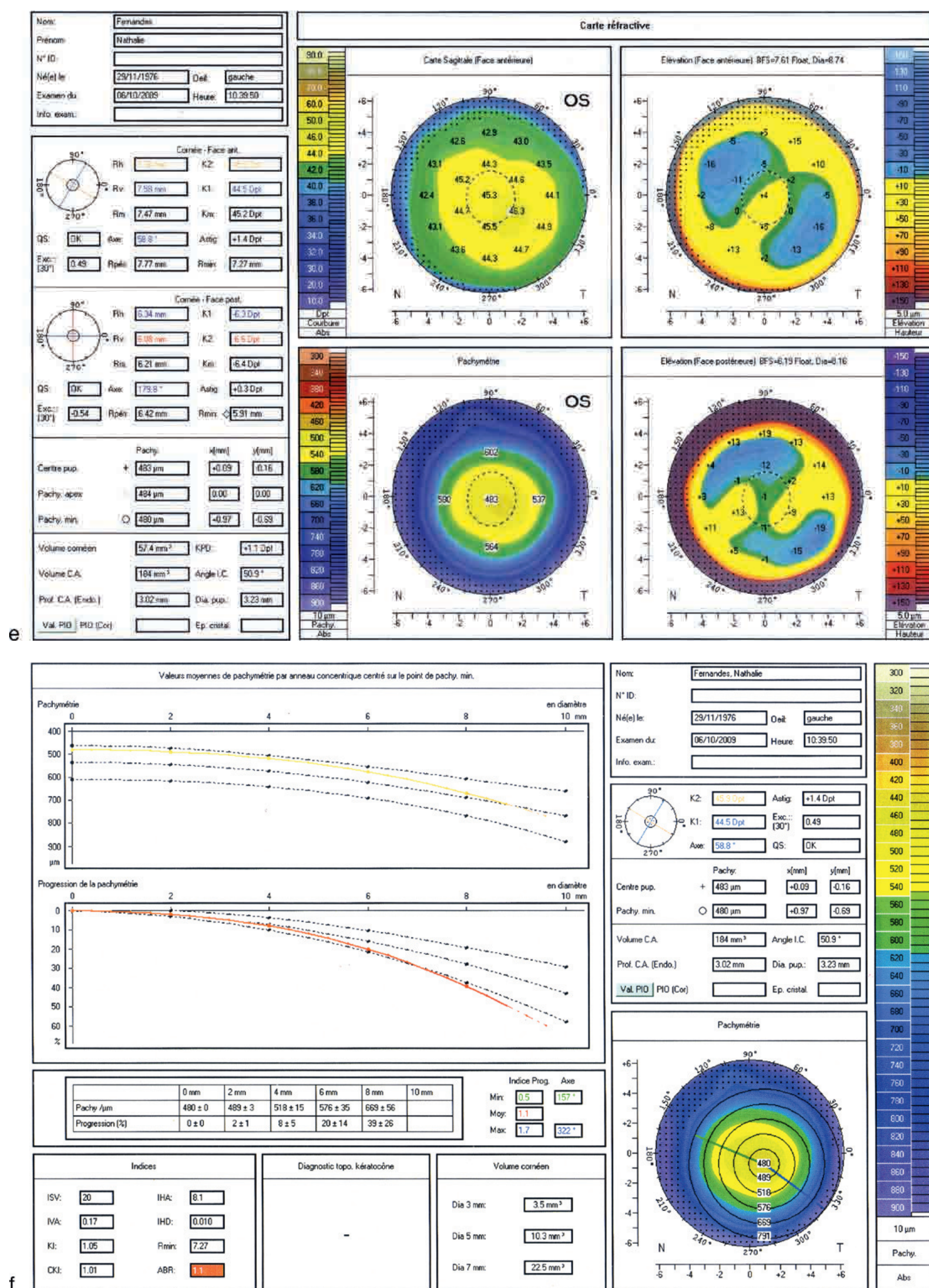



**Fig. 10.4.** (Suite).
*e. Œil gauche : comme pour l'œil droit, l'aspect global est similaire à celui présenté sur les cartes Orbscan. f. Œil gauche (suite) : la carte de progression de la pachymétrie révèle également de ce côté une progression trop rapide des variations de l'épaisseur cornéenne entre le point le plus fin et la périphérie.*

le spectre de l'ectasie post-Lasik, de nombreuses études sont consacrées à la quête d'indices topographiques et la mise au point de technique de dépistage automatisé pour ces formes suspectes [25–28].

Les Fig. 10.4 à 10.6 rassemblent plusieurs exemples particulièrement représentatifs, qui contiennent la plupart des manifestations topographiques rencontrées chez les cornées « à risque » . Il y existe pour chacun un faisceau d'arguments cliniques et topographiques en faveur de la présence d'une forme suspecte de kératocône. La Fig. 10.4 rassemble les images topographiques Orbscan et Pentacam d'une patiente demandeuse d'une chirurgie réfractive et pour laquelle le diagnostic de kératocône fruste peut être légitimement évoqué.

Les Fig. 10.5 et 10.6 montrent d'autres exemples de cartes évocatrices de la présence de kératocône infraclinique (forme fruste de kératocône) sur au moins l'un des deux yeux. Pour chacun de ces examens, l'échelle de la

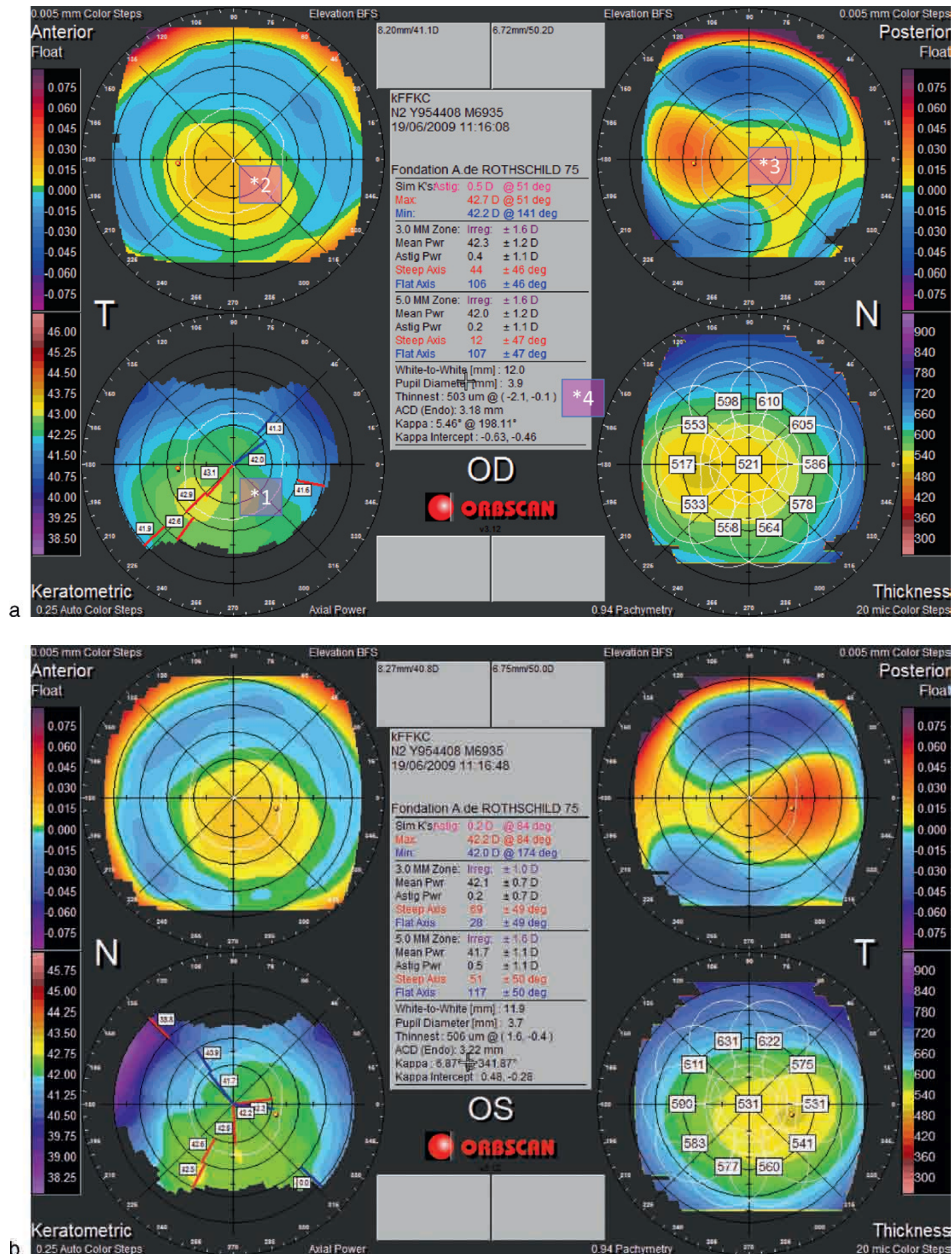



**Fig. 10.5. Patient âgé de 25 ans, présentant une myopie légère.**
*Les éléments devant alarmer quant à la possibilité d'une forme fruste devant cette carte Orbscan sont : pour l'œil droit (a) : *1 = distribution asymétrique de la courbure antérieure (carte de courbure axiale), avec cambrure plus marquée dans la région temporale inférieure ; *2 = léger décalage inféro-temporal de la zone d'élévation positive vis-à-vis de la sphère de référence en élévation antérieure ; *3 = absence de parallélisme entre la distribution de l'élévation postérieure et l'élévation postérieure, avec zone d'élévation positive accentuée en temporal ; *4 = zone d'amincissement temporal : l'épaisseur du point le plus fin n'est que de 503 µm. L'angle kappa possède une valeur moyenne. Cette cornée présente donc un amincissement paracentral temporal suspect, et ce d'autant plus qu'il est associé à une asymétrie de cambrure, qui est légèrement plus marquée en temporal. Pour l'œil gauche (b), les signes évocateurs d'une forme infraclinique de kératocône sont les mêmes que pour l'œil droit : on note en plus la présence d'un SRAX sur la carte de courbure axiale (mais la toricité cornéenne régulière est très modérée ; cf. la valeur faible de l'astigmatisme de la kératométrie simulée Sim-K).*

carte en mode axial représentée a été ajustée en *autoscale*. Les bornes de cette échelle étant particulièrement proches, elles révèlent la présence d'irrégularités de courbures qui seraient masquées avec une échelle classique (dans ces deux exemples, l'examen Placido et les indices de Klyce et Maeda étaient négatifs pour le dépistage du kératocône avéré et suspect).

## Dégénérescence marginale pellucide

La dégénérescence pellucide marginale est une affection cornéenne qui est la conséquence d'un amincissement

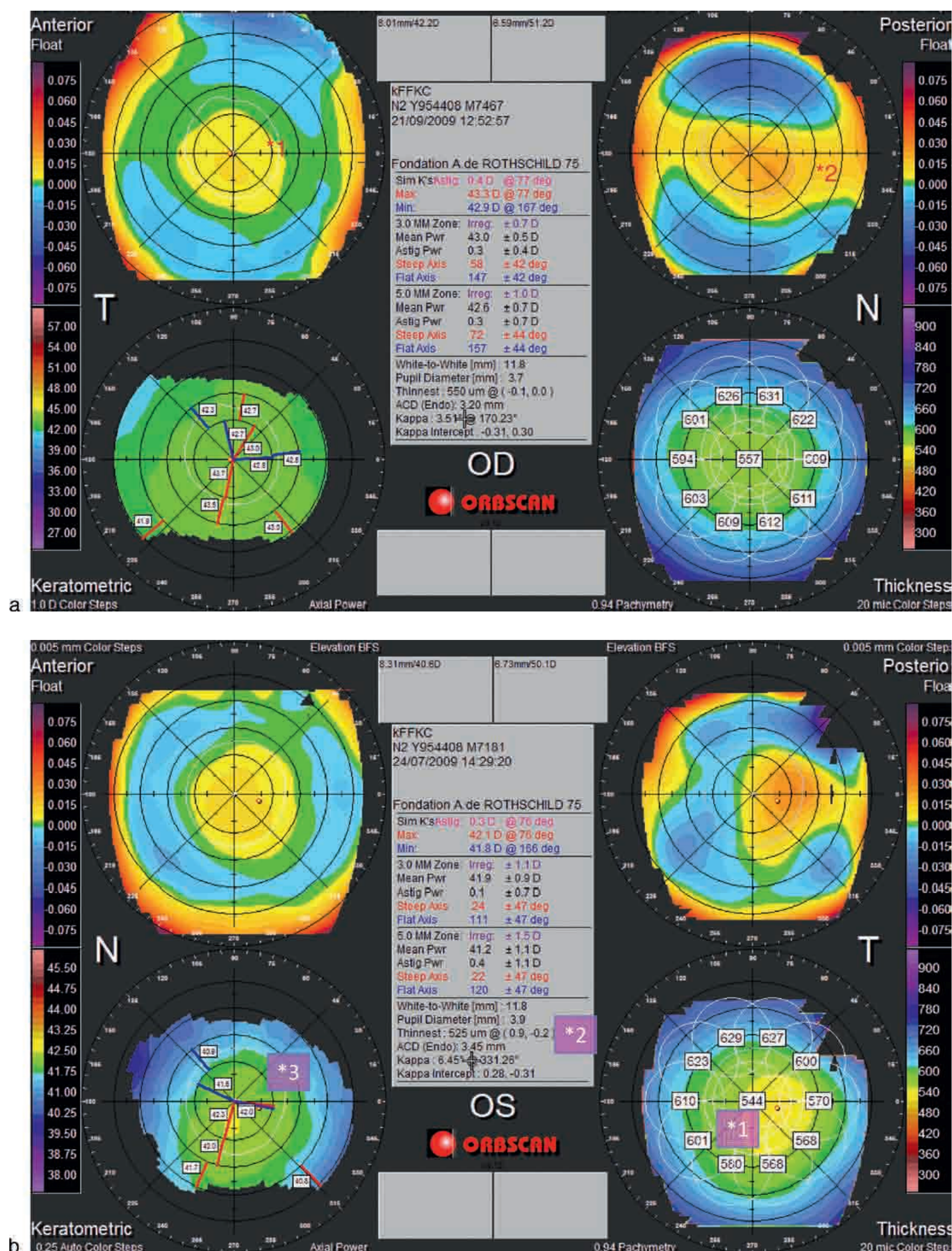



**Fig. 10.6.** *Cartes Orbscan obtenues chez un patient de 31 ans demandeur de chirurgie réfractive pour la correction d'une myopie moyenne.*
*a. L'œil droit ne révèle pas d'anomalies notables, même si *1 : la zone d'élévation positive sur la carte d'élévation antérieure est légèrement décalée en inférieur ; *2 : la zone d'élévation positive sur la carte d'élévation postérieure est également décalée en temporal inférieur ; l'élévation maximale vis-à-vis de la sphère de référence est supérieure à 35 µm. b. Œil gauche. On remarque sur cette carte des signes plus alarmants que du côté gauche : *1 = amincissement notable en temporal, responsable d'une réduction de 13 µm pour l'épaisseur centrale moyenne comparée à celle de l'œil droit ; *2 = différence de 19 µm entre l'épaisseur moyenne centrale et celle du point le plus fin ; *3 = aspect de SRAX, alors que la toricité cornéenne régulière est faible (Sim-K Astig : 0,3 D).*

progressif situé à la périphérie inférieure de la cornée ; son origine est inconnue [29]. La dégénérescence pellucide intéresse les deux yeux, où elle présente généralement un stade d'évolution comparable (Fig. 10.7 et 10.8). Elle provoque une cambrure asymétrique localisée de la partie inférieure de la cornée ; ses deux surfaces (antérieures et postérieures) subissent une réduction de la courbure centrale, et une protrusion antérieure au-dessus de la zone périphérique inférieure amincie. L'aspect topographique caractéristique et fortement évocateur (mais non spécifique [30]) de la dégénérescence pellucide marginale s'observe au niveau de la carte de courbure axiale : il associe un aplatissement des deux tiers supérieurs des méridiens verticaux et une cambrure des hémiméridiens obliques inférieurs qui produisent un aspect en « moustaches gauloises », ou « ailes de moulin ». Les Anglo-Saxons utilisent généralement le terme « d'aspect en pince » (*claw-shaped pattern*).

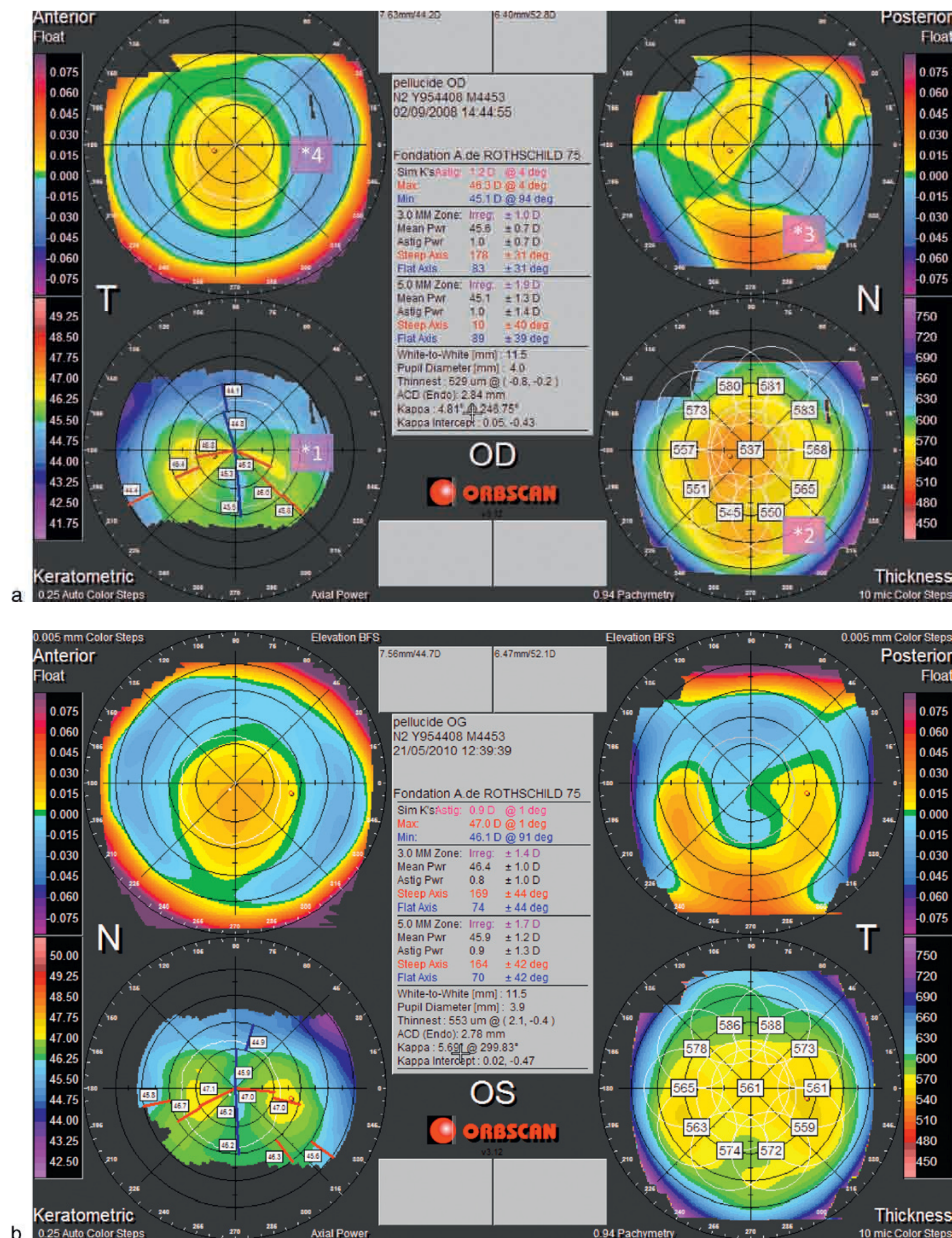



***Fig. 10.7. Examen topographique Orbscan à l'occasion d'un bilan d'astigmatisme évolutif inverse chez un patient de 48 ans, révélant un aspect fortement évocateur de dégénérescence marginale pellucide.***
*a. Œil droit : *1 = aspect en « aile de moulin » de la carte de courbure axiale, dû à la cambrure accentuée des méridiens horizontaux et obliques inverses ; *2 = mise en évidence par la carte d'épaisseur cornéenne pachymétrique d'un amincissement cornéen notable à la périphérie inférieure du mur cornéen ; *3 = sur la carte d'élévation postérieure, nette augmentation de l'élévation vis-à-vis de la sphère de référence en inférieur : cet aspect « en coulée inférieure » est relié à l'amincissement inférieur ; *4 = îlot central d'élévation positive de pourtour ovalaire à grand axe vertical, ceci permet parfois de différencier dégénérescence pellucide et kératocône. b. Œil gauche : on retrouve les caractéristiques présentes au niveau de l'œil droit, quoique légèrement atténuées. Noter l'aspect caractéristique de l'élévation postérieure.*

La toricité cornéenne centrale est marquée ; elle induit un astigmatisme réfractif prononcé, dont l'axe est inverse (non conforme) car la portion des méridiens verticaux située en regard de la zone correspondant à la pupille d'entrée possède une courbure réduite vis-à-vis de celle des méridiens horizontaux. La puissance cornéenne la plus faible se situe donc dans un couloir vertical central, et la zone de cambrure la plus élevée s'étend le long de la cornée inférieure des deux côtés de la portion verticale aplatie (courbure axiale). Il est important de garder en mémoire que les cartes de courbure axiale ne doivent pas être interprétées comme des relevés « anatomiques » ; l'aspect en « moustaches gauloises » ne correspond qu'à une interprétation indirecte (courbure axiale) des modifications géométriques du mur cornéen, conséquences de l'amincissement périphérique inférieur. L'inspection des cartes d'élévation est plus instructive quant à ces modifications : l'amincissement périphérique inférieur marqué de la cornée est responsable d'une « cassure » locale du galbe cornéen.

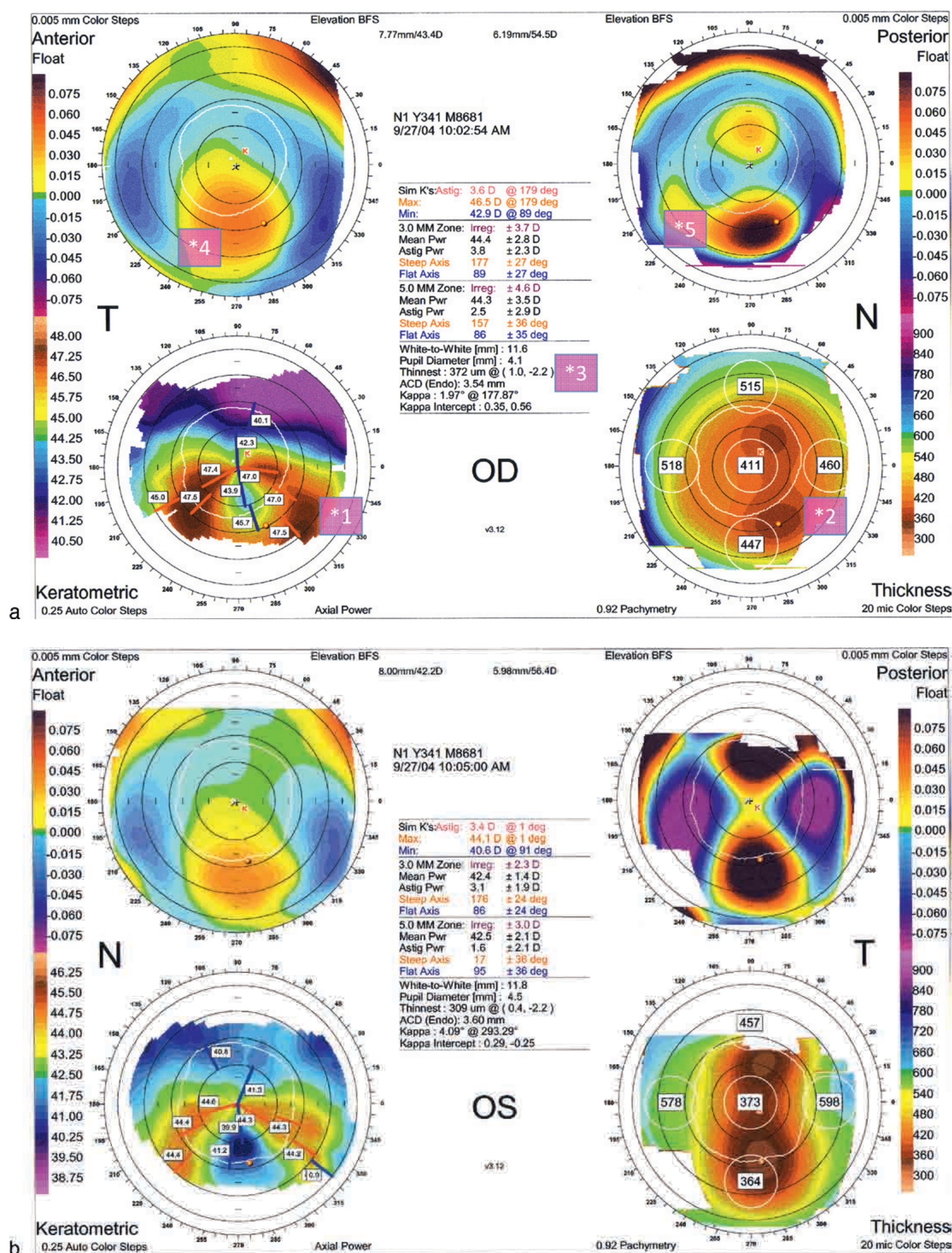


**Fig. 10.8. Patient âgé de 57 ans présentant une baisse de la meilleure acuité visuelle bilatérale, concomitante d'une accentuation de la magnitude d'un astigmatisme non conforme (astigmatisme « inverse »).**
*La topographie cornéenne de courbure et d'élévation (Orbscan) révèle la présence d'une forme avancée de dégénérescence marginale pellucide jusque-là méconnue. a. Œil droit : *1 = l'aspect de toricité et d'irrégularité est marqué sur la carte de courbure axiale : aspect typique en « moustaches gauloises » ; *2 = la pachymétrie optique souligne l'existence d'un amincissement cornéen marqué en inférieur ; *3 = l'excentricité du point le plus fin est très marquée en inférieur ; *4 = en élévation antérieure, on note un déplacement inférieur important de l'îlot d'élévation positive vis-à-vis de la sphère de référence, en direction de la zone amincie ; *5 = en élévation postérieure, la saillie de l'îlot d'élévation positive est encore plus prononcée et décalée en inférieur. b. Les signes topographiques notés au niveau de l'œil droit sont retrouvés du côté gauche, où ils constituent un tableau typique de dégénérescence marginale pellucide.*

La carte d'épaisseur révèle en effet une zone d'amincissement inférieure, située en périphérie de la cornée, en regard des hémiméridiens proches de l'axe vertical. Quand il est prononcé, cet amincissement peut même être perceptible à l'examen biomicroscopique. L'amincissement périphérique inférieur est associé à des manifestations concomitantes au niveau de la face postérieure de la cornée, où l'on observe la nette « migration » inférieure de l'îlot d'élévation positive habituellement centrale et liée à l'asphéricité prolate, réalisant parfois un aspect en « coulée verticale inférieure ».

*A contrario*, l'absence de ce type de modifications postérieures et de l'amincissement inférieur permet d'éliminer le diagnostic de dégénérescence marginale pellucide chez le patient de la cinquantaine qui présente un astigmatisme cornéen non conforme prononcé (Fig. 10.9).

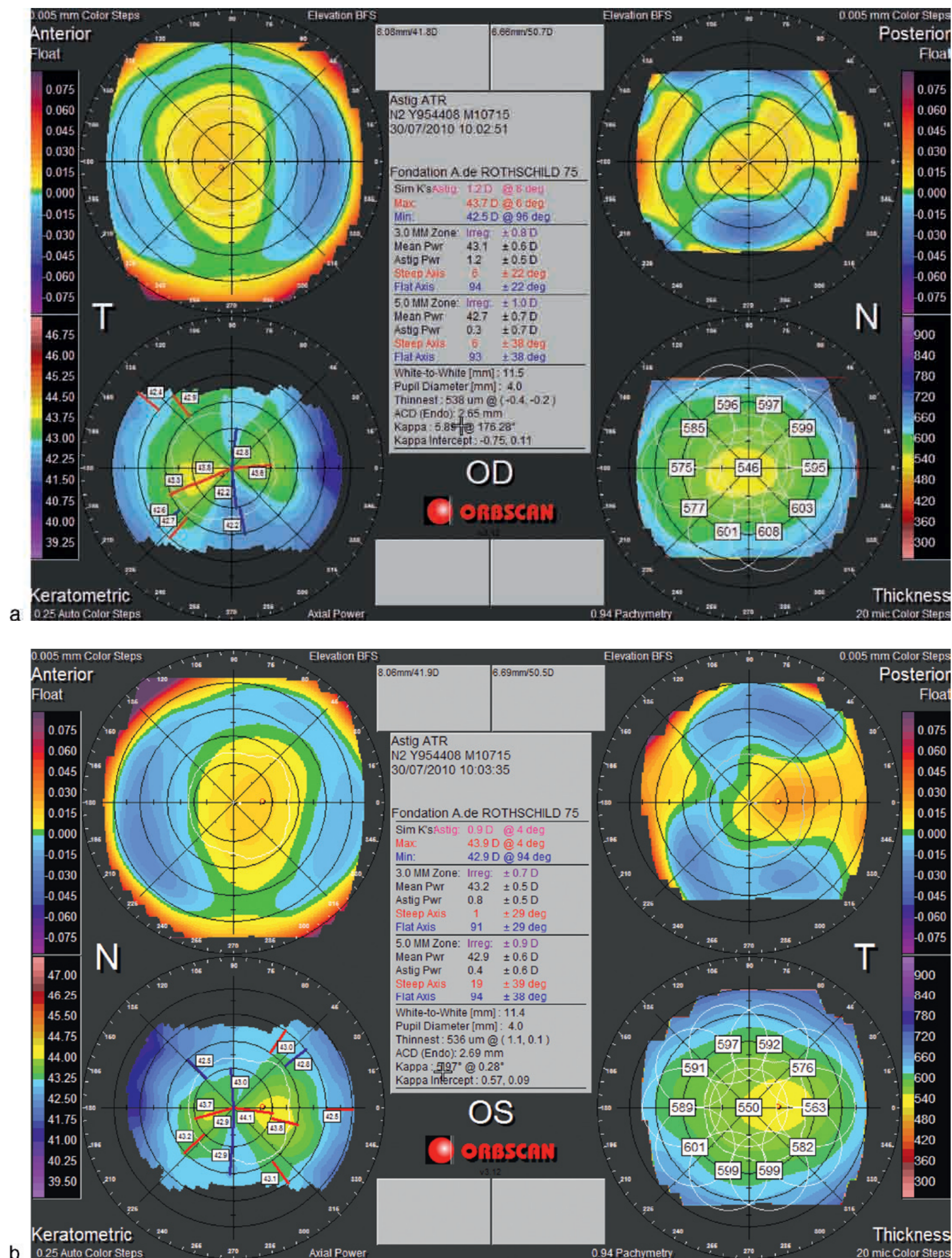



**Fig. 10.9.** ***Patiente de 55 ans présentant un astigmatisme myopique prononcé non conforme et légèrement irrégulier (aspect de SRAX sur les cartes de courbure axiale).***
*a. Œil droit. b. Œil gauche. À droite comme à gauche, l'aspect « banal » de la carte d'élévation de la face postérieure et l'absence d'amincissement marqué en inférieur permettent d'écarter le diagnostic de dégénérescence pellucide marginale.*

Le diagnostic de DPM est en règle générale posé plus tard dans la vie que celui du kératocône, habituellement entre 40 et 60 ans, lorsque les patients consultent pour l'apparition ou l'accentuation d'un astigmatisme de direction non conforme, voire une perte de la meilleure acuité visuelle corrigée due à un astigmatisme irrégulier. La prise en charge non chirurgicale de la DPM (adaptation de LC : lentilles de contact) continue à occuper une place prédominante dans la prise en charge de cette affection. La réalisation d'une chirurgie de type Lasik est contre-indiquée en raison du risque d'ectasie induit. La greffe de cornée s'accompagne souvent d'une meilleure acuité visuelle corrigée médiocre et d'un suivi prolongé (au moins 8 ans), car il faut généralement réaliser une greffe large et/ou légèrement décentrée en inférieur. L'apparition tardive d'un astigmatisme réfractive inverse d'origine cornéenne bilatéral doit faire suspecter la présence d'une dégénérescence pellucide marginale débutante.

La DPM partage certains points avec le kératocône : c'est une dégénérescence non inflammatoire, et il n'y a ni vascularisation ni dépôts lipidiques. L'aspect de la carte de courbure axiale ne lui est pas spécifique, et s'observe

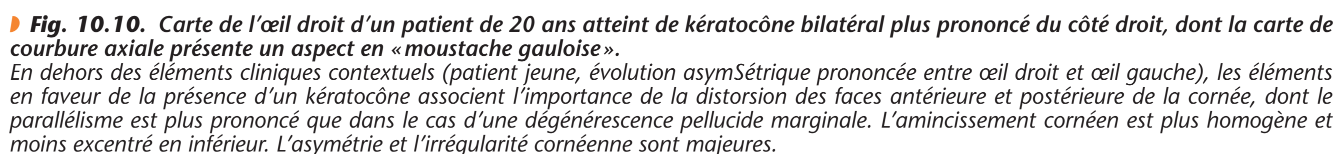


**Fig. 10.10. *Carte de l'œil droit d'un patient de 20 ans atteint de kératocône bilatéral plus prononcé du côté droit, dont la carte de courbure axiale présente un aspect en «moustache gauloise».***
*En dehors des éléments cliniques contextuels (patient jeune, évolution asymSétrique prononcée entre œil droit et œil gauche), les éléments en faveur de la présence d'un kératocône associent l'importance de la distorsion des faces antérieure et postérieure de la cornée, dont le parallélisme est plus prononcé que dans le cas d'une dégénérescence pellucide marginale. L'amincissement cornéen est plus homogène et moins excentré en inférieur. L'asymétrie et l'irrégularité cornéenne sont majeures.*

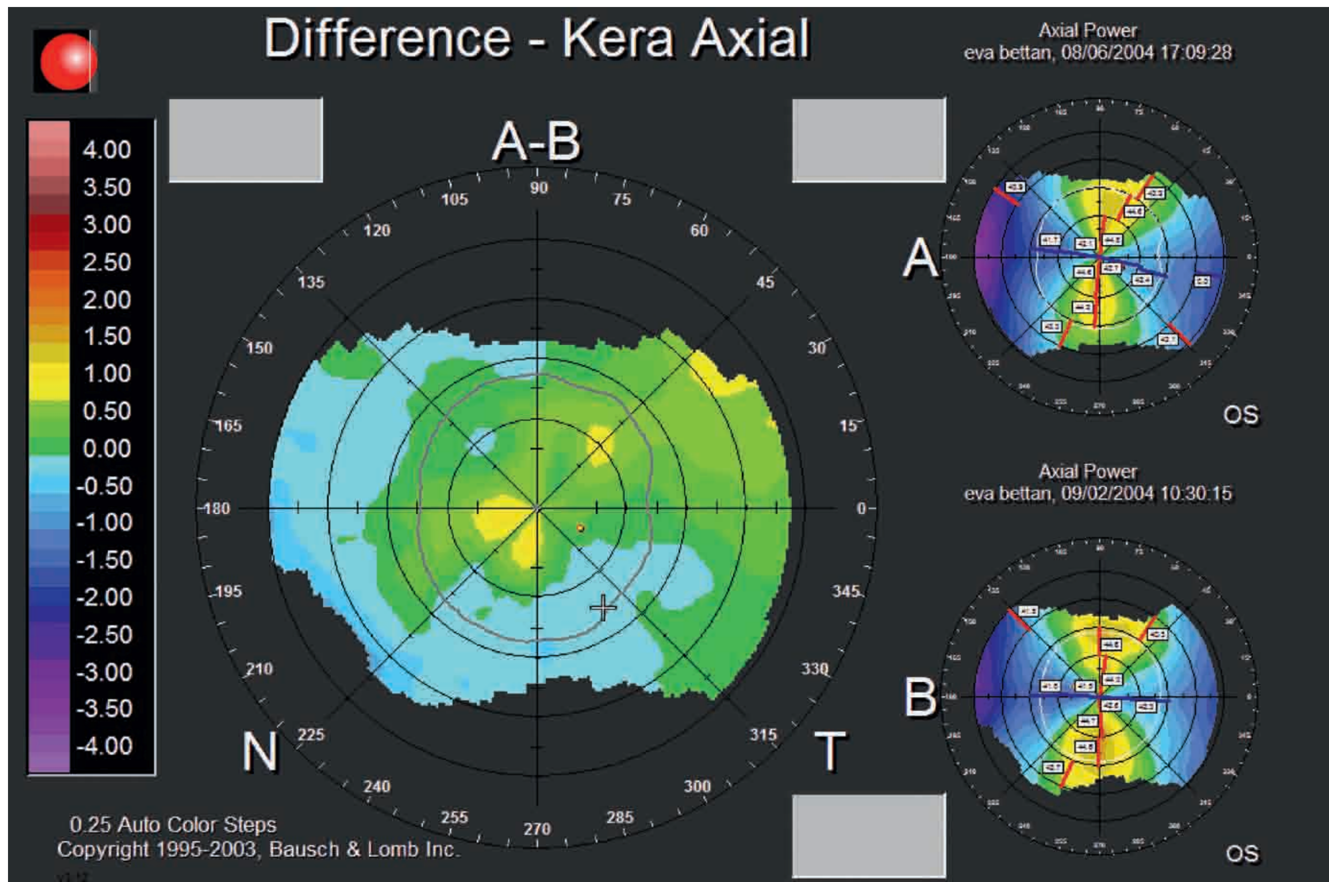



**Fig. 10.12. Carte différentielle en mode axial effectuée entre des données recueillies avant (A) et 4 mois après retrait définitif de lentilles de contact rigides perméables à l'oxygène (A).**
*Les données correspondent au sens de soustraction (A-B). Noter le contraste entre la réduction de la courbure de l'hémicornée inférieure et l'augmentation de la courbure centrale. Localement, certains écarts atteignent 2 dioptries.*

également chez certaines cornées atteintes de kératocône. Dans ce contexte, en plus du contexte clinique (âge, comparaison des stades évolutifs entre yeux droit et gauche), l'utilisation de la carte d'épaisseur (pachymétrie optique) et l'étude des anomalies de l'élévation sont importantes pour aider à différencier kératocône et dégénérescence pellucide (Fig. 10.10).

## Corneal warpage : *déformation induite par les lentilles de contact*

Le terme de *corneal warpage* est synonyme d'anomalie topographique transitoire et réversible induite par le port prolongé des lentilles de contact rigides (Fig. 10.11). Elles semblent dues à un remodelage de la couche épithéliale en contact avec la lentille.

Ces modifications sont plus fréquentes après le port prolongé de lentilles de contact rigides perméables aux gaz. Les anomalies topographiques comportent un astigmatisme central irrégulier, la réduction de l'asphéricité cornéenne négative, voire l'induction d'une cornée de profil oblate, un aspect en nœud papillon asymétrique ou des zones de cambrure localisées. Les lentilles hautes produisent habituellement un aplatissement supérieur et une cambrure inférieure relative en raison de l'aplatissement de la cornée sous-jacente à la lentille [31, 32]. Le recours à la topographie de courbure en mode instantané (tangentiel) est intéressant car il révèle parfois la présence d'une zone de cambrure annulaire en moyenne périphérie, qui permet de poser le diagnostic. Les cartes pachymétriques ne montrent pas d'amincissement central plus marqué (en l'absence de pathologie associée).

◀ **Fig. 10.11. Comparaison entre les cartes de courbure en mode axial (en haut) et tangentiel (en bas) chez une patiente porteuse de lentilles rigides depuis 15 ans.**
*L'examen a été effectué une heure après le retrait des lentilles. L'examen en mode tangentiel est plus « dynamique » vis-à-vis de la progression de la cambrure entre le centre et les bords de la cornée ; il révèle une réduction de la cambrure centrale, entièrement circonscrite par une zone de cambrure augmentée, ce qui est assez caractéristique, et peu en faveur du kératocône infraclinique. Ce type d'image est couramment observé en orthokératologie (adaptation à visée réfractive de lentilles rigides dont le mode d'action est comme en chirurgie réfractive d'agir directement sur le relief antérieur de la cornée, de manière réversible toutefois). En mode axial, la cambrure paracentrale causée par la lentille se révèle être plus prononcée en inférieur qu'en supérieur. L'aspect en « sourire » conféré par la « remontée » latérale légère de la zone de cambrure paracentrale inférieure accentuée est caractéristique de la déformation induite par le* warpage.

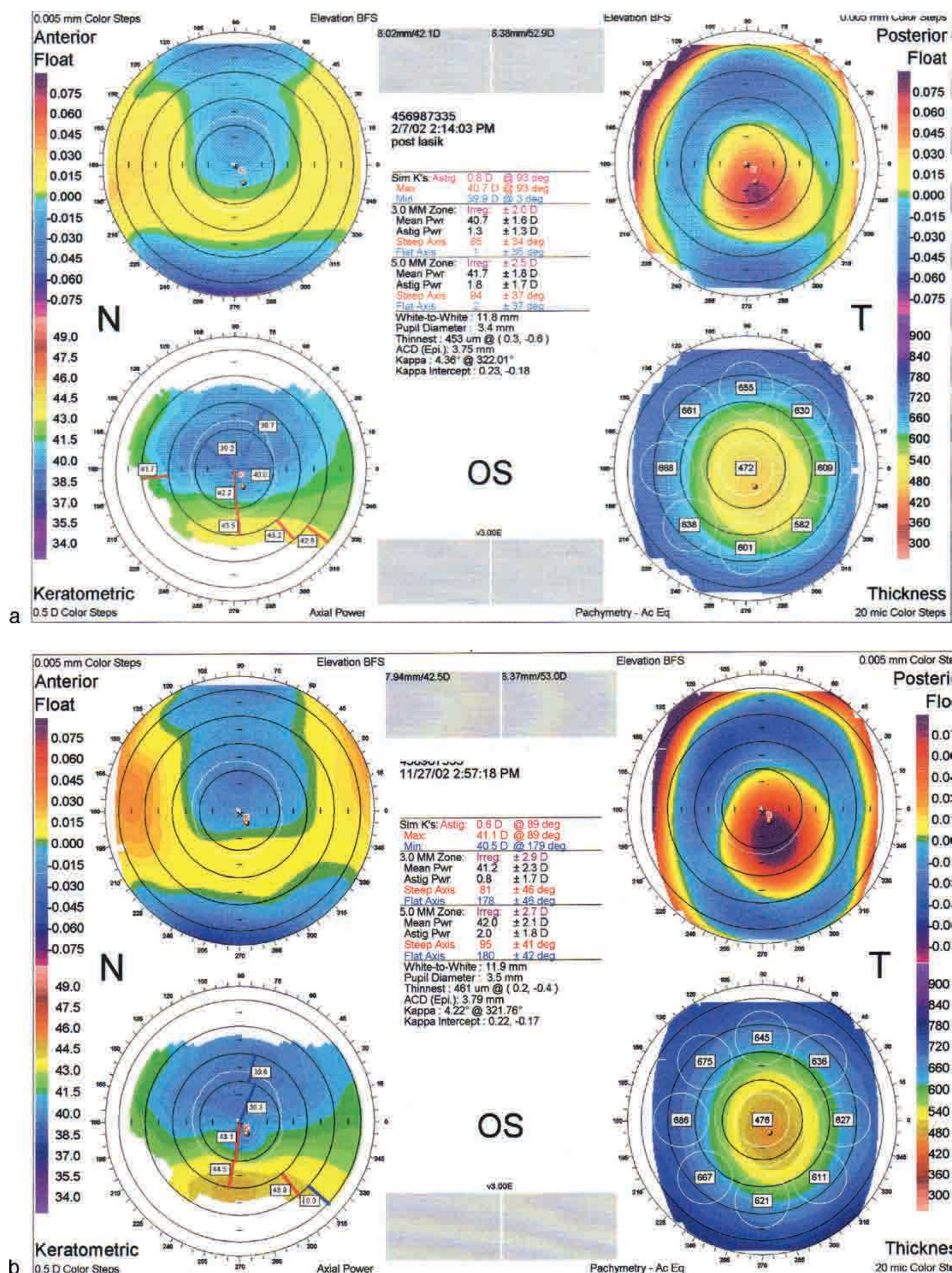



***Fig. 10.13. Carte topographique (Orbscan, mode* Quad Map*) effectuée 3 semaines après LASIK pour un astigmatisme myopique composé (profondeur d'ablation : 65 µm, épaisseur planifiée du volet cornéen : 160 µm).***
*Le patient signale une diplopie monoculaire verticale. a. Explorée en mode axial, la cambrure cornéenne présente une importante asymétrie verticale ; la réduction de la cambrure verticale notée en supérieur est la conséquence de la photoablation démyopisante. En mode élévation, cette asymétrie verticale est également bien présente au niveau de la surface antérieure de la cornée. Restreinte à l'étude de la face antérieure de la cornée, cette analyse suggère la possibilité d'un décentrement supérieur de la photoablation. Toutefois, l'élévation positive notée au niveau de la face postérieure de la cornée, maximale en regard du point le plus fin, doit faire éliminer la survenue d'une ectasie iatrogène. b. L'examen topographique est répété quelques mois plus tard, et confirme la présence d'une ectasie : la cambrure inférieure est accentuée (courbure axiale) et, on note une nette accentuation de l'élévation positive en face postérieure.*

L'évaluation topographique préopératoire en chirurgie réfractive doit être réalisée au moins une semaine après l'arrêt du port de LC souples. Après l'arrêt du port de LC rigides, il est recommandé d'attendre un mois avant de procéder à l'évaluation. Si des anomalies cornéennes sont détectées, une évaluation mensuelle devra être réalisée jusqu'à stabilisation du profil topographique. Au moins deux topographies ayant le même profil sont recommandées avant de planifier une chirurgie réfractive. La réalisation de cartes différentielles permet de

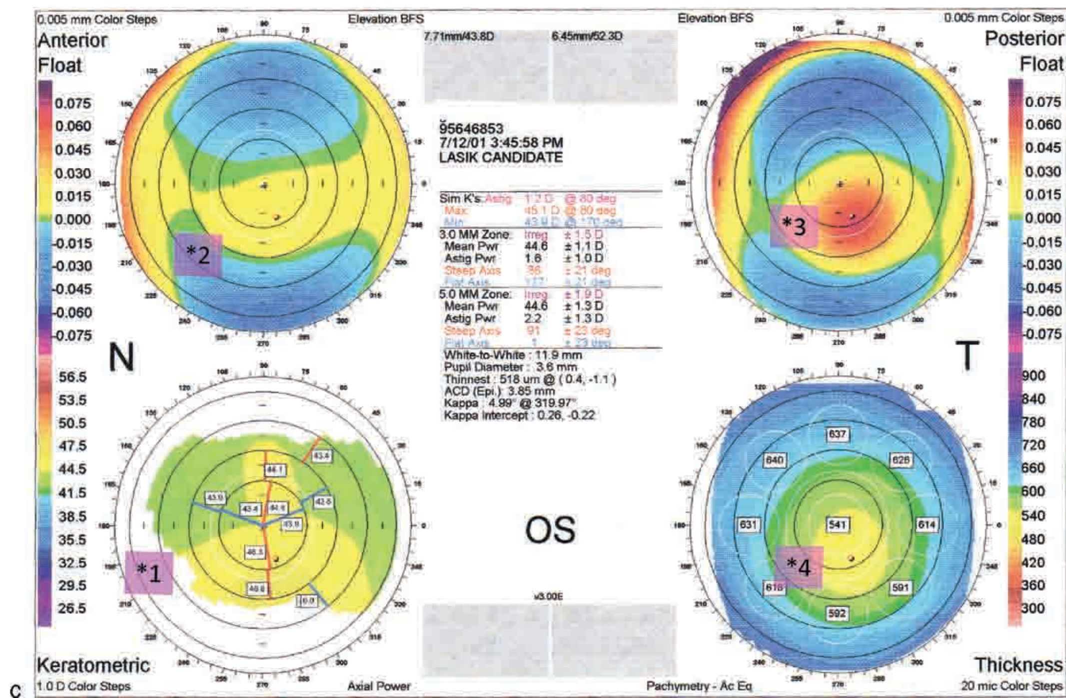



***Fig. 10.13.** (Suite).*
*c. À l'inspection de la carte Orbscan préopératoire, on note plusieurs arguments en faveur d'une forme infraclinique de kératocône : *1 = asymétrie verticale de cambrure : l'hémicornée inférieure est plus cambrée, mais la visualisation de cette hypercambrure est en partie masquée par l'utilisation d'une échelle trop large ; *2 = décalage inférieur du « promontoire » horizontal d'élévation positive, traduisant une déformation ectatique précoce de la face avant, dont la carte est dominée par un mélange de toricité et d'asymétrie ; *3 = accentuation de l'asphéricité prolate de la face postérieure de la cornée, et décalage de l'îlot central d'élévation positive en inféro-temporal ; *4 = décalage inférieur prononcé du point le plus fin, au centre d'une zone d'amincissement concentrique.*

quantifier le différentiel de courbure induit par l'ablation de la lentille, puis de s'assurer de la stabilité topographique (Fig. 10.12).

La présence d'un *corneal warpage* peut faire évoquer la présence d'une forme infraclinique à l'examen topographique. Le diagnostic différentiel repose sur l'analyse fine de cartes de courbure en mode instantané ou de pachymétrie, et surtout l'évolution. Toutefois, la constatation d'un *corneal warpage* n'exclut pas la possibilité d'une forme de kératocône infraclinique sous-jacente.

Wang *et al.* ont étudié de manière prospective les yeux de 165 patients consécutifs porteurs de LC évalués en vue d'une chirurgie réfractive [33]. Une déformation cornéenne significative induite par les LC a été détectée par topographie cornéenne dans 20 yeux de 11 patients (12 %). Chez les patients présentant une déformation induite par les lentilles de contact, la durée moyenne de port antérieur de LC était de 21,2 ans (extrêmes : 10–30 ans). Le temps de récupération moyen avant stabilisation de la réfraction, des valeurs kératométriques et du profil topographique a été de 7,8 ± 6,7 semaines. Les taux de récupération ont été différents selon les types de lentilles : lentilles souples à port prolongé 11,6 ± 8,5 semaines, lentilles souples toriques 5,5 ± 4,9 semaines, lentilles souples à port journalier 2,5 ± 2,1 semaines et lentilles rigides perméables aux gaz 8,8 ± 6,8 semaines. Cette étude a montré la nécessité de réfractions répétées, de kératométries et de topographies cornéennes stables documentées avant de planifier une chirurgie réfractive chez les patients avec une suspicion de déformation cornéenne.

## Ectasie cornéenne induite par le Lasik (kératectasie)

L'ectasie cornéenne iatrogène est une complication redoutable, définie par une cambrure progressive et asymétrique, souvent accompagnée d'un amincissement secondaire de la cornée qui survient quelques semaines à quelques mois après la chirurgie cornéenne [11]. Le Lasik est la cause principale d'ectasie iatrogène (kératectasie), même si quelques cas anecdotiques d'ectasie après photokératectomie à visée réfractive ont été rapportés. Selon Randleman, 50 % des cas d'ectasies sont survenus dans les 12 mois postopératoires [16, 17]. Néanmoins des cas d'ectasie ont été décrits jusqu'à 4 ans post-Lasik [34], et nous avons observé des formes à déclaration plus tardive (environ 7 ans). L'incidence de l'ectasie est difficile à évaluer, mais elle varie dans les études entre 0,01 à 0,9 % [16, 17]. Le mécanisme à l'origine de l'ectasie cornéenne est une perte de rigidité du mur stromal résiduel [35]. Ce défect biomécanique chronique peut être expliqué par un glissement interlamellaire et interfibrillaire (fracture interlamellaire et interfibrillaire) : cette altération est également présente dans les yeux atteints de kératocône.

Randleman *et al.* [16, 17] ont étudié tous les cas d'ectasies survenus après chirurgie réfractive publiés jusqu'en décembre 2005 (soit 171 cas) et ont établi un *Risk Score System* capable selon eux de détecter les cas à risque d'ectasie avec une sensibilité de 96 % et une spécificité de 91 %. Les facteurs de risque les plus importants étaient, par ordre décroissant, une topographie

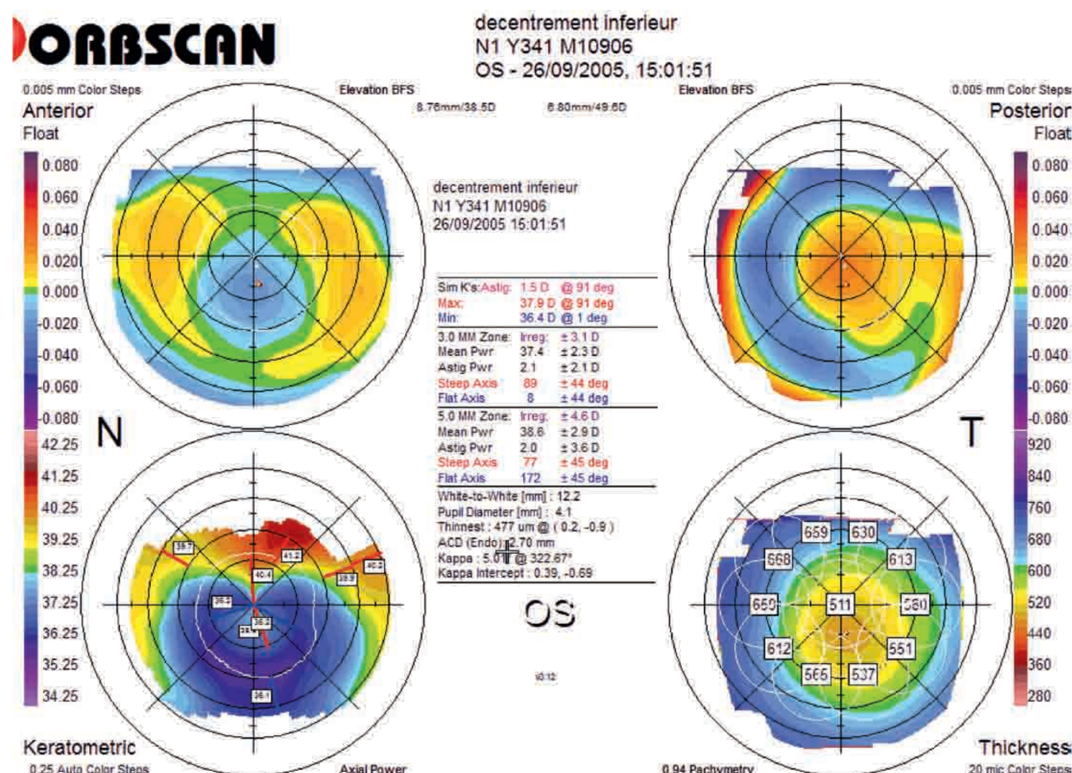



***Fig. 10.14.*** ***Décentrement de la photoablation (post-Lasik pour la correction d'un astigmatisme myopique composé).***
*Outre la direction inférieure du décentrement, responsable de l'asymétrie de répartition de la courbure axiale (augmentation de la cambrure en supérieur, ce qui est atypique pour une ectasie), on note une préservation de la position centrée de l'îlot d'élévation positive à la face postérieure de la cornée. Le point le plus fin n'est pas situé en regard de la zone d'élévation positive maximale postérieure.*

cornéenne anormale, une faible épaisseur du mur résiduel, l'âge jeune, et la faible pachymétrie préopératoire. Les travaux de Binder [15] effectués sur un suivi de 9700 yeux opérés de Lasik et indemnes d'ectasie à 2 ans, alors qu'ils présentaient au moins un des facteurs de risque classiquement admis pour l'ectasie (épaisseur cornéenne centrale préopératoire inférieure à 500 µm, kératométrie centrale de plus de 47 dioptries, âge inférieur à 25 ans, correction supérieure à –8 dioptries, astigmatisme inverse de 2 dioptries, mur résiduel de moins de 250 µm) suggèrent qu'il existe d'autres facteurs de risque que ceux incriminés.

Il n'en demeure pas moins qu'il est admis que la majeure partie des ectasies rapportées sont consécutives à la chirurgie par Lasik réalisée sur des patients atteints de kératocônes frustres malheureusement non diagnostiqués avant la chirurgie.

Le diagnostic d'ectasie est posé suite à une baisse de la meilleure acuité visuelle après Lasik, accompagnée de manifestations topographiques évocatrices : augmentation de la cambrure paracentrale inférieure, en regard d'une augmentation franche de l'élévation positive au niveau de la face postérieure de la cornée (Fig. 10.13). Ces manifestations doivent être précisément identifiées et ne pas être confondues avec un décentrement supérieur quand elles sont précoces (Fig. 10.14), ou avec la manifestation tardive d'une régression cicatricielle quand elles sont plus tardives.

**Références**


[1] Amsler M. The « forme frusta » of keratoconus. Wien Klin Wochenschr 1961 ; 73 : 842–3.

[2] Rabinowitz YS. Tangential *vs* sagittal videokeratographs in the « early » detection of keratoconus. Am J Ophthalmol 1996 ; 122 (6) : 887–9.

[3] Li X, Rabinowitz YS, Rasheed K, Yang H. Longitudinal study of the normal eyes in unilateral keratoconus patients. Ophthalmology 2004 ; 111 (3) : 440–6.

[4] Nilforoushan MR, Speaker M, Marmor M, Abramson J, Tullo W, Morschauser D, et al. Comparative evaluation of refractive surgery candidates with Placido topography, Orbscan II, Pentacam, and wavefront analysis. J Cataract Refract Surg 2008 ; 34 (4) : 623–31.

[5] Levy D, Hutchings H, Rouland JF, Guell J, Burillon C, Arné JL, et al. Videokeratographic anomalies in familial keratoconus. Ophthalmology 2004 ; 111 (5) : 867–74.

[6] Karimian F, Aramesh S, Rabei HM, Javadi MA, Rafati N. Topographic evaluation of relatives of patients with keratoconus. Cornea 2008 ; 27 (8) : 874–8.

[7] Saad A, Gatinel D. Topography and Tomography Properties of Forme Fruste Keratoconus Corneas. Invest Ophthalmol Vis Sci 2010 ; Jun 16.

[8] Li X, Yang H, Rabinowitz YS. Keratoconus : classification scheme based on videokeratography and clinical signs. J Cataract Refract Surg 2009 ; 35 (9) : 1597–603.

[9] Klyce SD. Chasing the suspect : keratoconus. Br J Ophthalmol 2009 ; 93 (7) : 845–7.

[10] Schlegel Z, Hoang-Xuan T, Gatinel D. Comparison of and correlation between anterior and posterior corneal elevation maps in normal eyes and keratoconus-suspect eyes. J Cataract Refract Surg 2008 ; 34 (5) : 789–95.

[11] Seiler T, Koufala K, Richter G. Iatrogenic keratectasia after laser in situ keratomileusis. J Refract Surg 1998 ; 14 : 312–7.
[12] McMonnies CW, Boneham GC. Iatrogenic keratectasia following laser in situ keratomileusis. Keratoconus, allergy, itch, eye-rubbing and hand-dominance. Clin Exp Optom 2003 ; 86 (6) : 376–84.
[13] Lafond G, Bazin R, Lajoie C. Bilateral severe keratoconus after laser in situ keratomileusis in a patient with forme fruste keratoconus. J Cataract Refract Surg 2001 ; 27 (7) : 1115–8.
[14] Binder PS. Analysis of ectasia after laser in situ keratomileusis : risk factors. J Cataract Refract Surg 2007 ; 33 : 1530–8.
[15] Binder PS. Risk factors for ectasia after Lasik. J Cataract Refract Surg 2008 ; 34 : 2010–1.
[16] Randleman JB, Trattler WB, Stulting RD. Validation of the Ectasia Risk Score System for preoperative laser in situ keratomileusis screening. Am J Ophthalmol 2008 ; 145 : 813–8.
[17] Randleman JB, Woodward M, Lynn MJ, Stulting RD. Risk assessment for ectasia after corneal refractive surgery. Ophthalmology 2008 ; 115 : 37–50.
[18] Rabinowitz YS, Nesburn AB, McDonnell PJ. Videokeratography of the fellow eye in unilateral keratoconus. Ophthalmology 1993 ; 100 (2) : 181–6.
[19] Zghal I, Saragoussi JJ, Cotinat J, Renard G, Pouliquen Y. Quantitative topographic detection of keratoconus in the contralateral eye in clinically unilateral keratoconus. Apropos of 5 cases. J Fr Ophtalmol 1997 ; 20 (4) : 284–91.
[20] Mahon L, Kent D. Can true monocular keratoconus occur? Clin Exp Optom 2004 ; 87 : 126 author reply 126.
[21] Kennedy RH, Bourne WM, Dyer JA. A 48-year clinical and epidemiologic study of keratoconus. Am J Ophthalmol 1986 ; 101 : 267–73.
[22] Krachmer JH, Feder RS, Belin MW. Keratoconus and related noninflammatory corneal thinning disorders. Surv Ophthalmol 1984 ; 28 : 293–322.
[23] Li X, Rabinowitz YS, Rasheed K, Yang H. Longitudinal study of the normal eyes in unilateral keratoconus patients. Ophthalmology 2004 ; 111 : 440–6.
[24] Holland DR, Maeda N, Riveroll LH, Green MT, Klyce SD, Wilson SE. Unilateral keratoconus. Incidence and quantitative topographic analysis. Ophthalmology 1997 ; 104 : 1409–13.
[25] Rao SN, Raviv T, Majmudar PA, Epstein RJ. Role of Orbscan II in screening keratoconus suspects before refractive corneal surgery. Ophthalmology 2002 ; 109 : 1642–6.
[26] Buhren J, Kuhne C, Kohnen T. Wavefront analysis for the diagnosis of subclinical keratoconus. Ophthalmology 2006 ; 103 : 783–90.
[27] Buhren J, Kuhne C, Kohnen T. Defining subclinical keratoconus using corneal first-surface higher-order aberrations. Am J Ophthalmol 2007 ; 143 : 381–9.
[28] Ambrosio Jr R, Alonso RS, Luz A, Coca Velarde LG. Corneal-thickness spatial profile and corneal-volume distribution : tomographic indices to detect keratoconus. J Cataract Refract Surg 2006 ; 32 : 1851–9.
[29] Maguire LJ, Klyce SD, McDonald MB, Kaufman HE. Corneal topography of pellucid marginal degeneration. Ophthalmology 1987 ; 94 (5) : 519–24.
[30] Lee BW, Jurkunas UV, Harissi-Dagher M, Poothullil AM, Tobaigy FM, Azar DT. Ectatic disorders associated with a claw-shaped pattern on corneal topography. Am J Ophthalmol 2007 ; 144 (1) : 154–6.
[31] Harstein J. Corneal warping due to wearing of corneal contact lenses. Am J Ophthalmol 1965 ; 60 : 1103–4.
[32] Wilson SE, Lin DT, Klyce SD, Reidy JJ, Insler MS. Topographic changes in contact lens induced corneal warpage. Ophthalmology 1990 ; 97 : 734–44.
[33] Wang X, McCulley JP, Bowman RW, Cavanagh HD. Time to resolution of contact lens-induced corneal warpage prior to refractive surgery. CLAO J 2002 ; 28 (4) : 169–71.
[34] Tuli SS, Iyer S. Delayed ectasia following Lasik with no risk factors : is a 300-micron stromal bed enough? J Refract Surg 2007 ; 23 : 620–2.
[35] Dawson DG, Randleman JB, Grossniklaus HE, O'Brien TP, Dubovy SR, Schmack I, et al. Corneal ectasia after excimer laser keratorefractive surgery : histopathology, ultrastructure, and pathophysiology. Ophthalmology 2008 ; 115 : 2181–91.

Chapitre 11

# Indices et test de dépistages du kératocône infraclinique

L'ectasie cornéenne iatrogène est la complication la plus redoutée après Lasik : elle induit un tableau similaire à celui du kératocône. Topographiquement, elle se traduit le plus souvent par une augmentation progressive de la cambrure dans la zone paracentrale inférieure, entraînant une baisse de la meilleure acuité visuelle corrigée. À partir d'une large série de cas rapportés dans la littérature, Randleman *et al.* [1] ont proposé un score permettant de prédire le risque d'ectasie (*Ectasia Risk Score*) dans le but de prévenir la survenue de l'ectasie post-Lasik. Ce score prend en compte l'aspect topographique préopératoire, l'épaisseur cornéenne centrale préopératoire, le mur résiduel postérieur, l'âge du patient, la correction prévue de ces paramètres; la présence d'une forme non détectée de kératocône débutant est le facteur de risque principal de l'ectasie post-Lasik [2].

Le recours aux tests topographiques de dépistage du kératocône a été développé afin d'aider le clinicien à mieux identifier les formes le plus précoces de cette pathologie. Aujourd'hui encore, de nombreux efforts sont consacrés à l'identification des identifier les critères topographiques permettant un diagnostic encore plus précoce du kératocône. En effet, si les formes avancées de kératocône ne posent généralement pas de difficultés diagnostiques, aucune analyse de carte topographique ne permet de détecter avec une certitude absolue la présence d'une forme précoce de la maladie. Ceci est imputable aux éléments suivants :

– la qualité de l'examen (mouvement ou clignement du patient entraînant un manque de lisibilité de l'examen);
– défaut de perception ou d'analyse par le clinicien;
– stade du kératocône : les modifications topographiques précoces sont difficilement visibles et caractérisables.

En outre, il faut souligner que certaines anomalies cornéennes peuvent avoir la même expression topographique que le kératocône débutant (*corneal warpage*), et qu'il existe également des *variantes de la normale dont les aspects sont superposables à ceux présents au cours du kératocône débutant* (ex : augmentation de la cambrure en inférieur, angulation des hémiméridiens les plus cambrés, etc.).

Ce chapitre traite des indices et tests de dépistage topographiques qui ont été proposés pour faciliter l'identification précoce du kératocône infraclinique. Les termes « test » et « indice » sont parfois utilisés de manière interchangeable dans le cadre du dépistage. En toute rigueur, un test est une opération qui vise à produire un résultat positif ou négatif, ou une probabilité diagnostique. Le test repose sur l'utilisation d'un ou plusieurs indices numériques, qui sont alors combinés pour produire un score final. En fonction de ce score et du seuil fixé pour le test, un résultat est fourni. Un test peut également consister en un réseau neuronal, où sont entrées les valeurs de divers indices numériques, et qui produit un résultat semi-quantitatif (probabilité diagnostique pour une affection particulière). On dénomme généralement ce genre de test des indices et/ou du nom de son ou ses concepteurs (ex : indices de Rabinowitz), ce qui participe à la confusion implicite entre « test » et « indice ». Le lecteur embarrassé devra se souvenir que dès qu'il compare la valeur d'un indice à un seuil fixé, il effectue un test.

# Historique et terminologie

Historiquement, on doit à Amsler la première tentative de classification du kératocône en stades évolutifs : il utilisa un système photographique muni d'un disque de Placido [3]. D'entrée, il distingua deux groupes de kératocône : l'un pour lesquels le kératocône présentait des signes cliniques détectables (déformation visible à l'examen biomicroscopique, anneau de Fleischer, etc.), l'autre pour lequel seul l'examen du reflet de mires de Placido permettait le diagnostic, anticipant ainsi l'importance que revêtirait la topographie cornéenne dans cette affection. Dans ce dernier groupe pouvant être qualifié d'« infraclinique », Amsler dénomma « kératocône fruste » les formes les plus débutantes à l'examen du reflet du disque Placido.

L'introduction de la topographie cornéenne informatisée permit plus tard de constater l'existence d'un continuum entre les examens obtenus chez les sujets normaux et ceux atteints de kératocône. Depuis, l'utilisation de termes tels que « kératocône infraclinique », « forme suspecte de kératocône », « forme fruste de kératocône » a souvent été utilisée pour qualifier indifféremment les formes débutantes ou partageant certains des traits estompés du kératocône avéré.

Au début des années quatre-vingt-dix, Rabinowitz *et al.* ont établi à partir de la topographie spéculaire [4] des patterns évocateurs de kératocône débutant, ainsi de des indices quantitatifs (ex : l'indice I-S) dans le but d'obtenir des seuils numériques précis pour définir à partir de tests la présence d'une forme topographique suspecte de kératocône [5, 6]. L'antériorité de la topographie spéculaire (née au milieu des années quatre-vingt) explique en partie l'importance accordée à la face antérieure de la cornée pour le diagnostic positif et différentiel du kératocône [7, 8]. L'introduction de la topographie d'élévation à la fin des années quatre-vingt-dix a apporté au clinicien des données nouvelles, issues de la pachymétrie et de l'élévation postérieure et pouvant elles aussi éveiller la suspicion vis-à-vis d'une forme suspecte de kératocône [9]. En général, un amincissement central accru et une élévation plus marquée vis-à-vis de la sphère de référence étaient retrouvés au niveau de la surface antérieure et surtout postérieure pour les cornées dont l'examen topographique Placido était évocateur de kératocône [10–12]. Ainsi, lorsque la carte topographique spéculaire antérieure est normale (non suspecte de kératocône), mais que la cornée présente une épaisseur réduite et une élévation postérieure accrue, la possibilité d'une forme très précoce de kératocône infraclinique ne peut être exclue. Nous avons montré que la normalité d'un examen topographique Placido (selon les critères en vigueur : critères de Klyce et Maeda) n'excluait en rien la possibilité d'une forme très précoce (fruste) de kératocône, et construit un modèle d'analyse discriminante permettant d'effectuer un test de dépistage à partir de données d'élévation et d'épaisseur [13].

En cohérence avec ces constatations et pour dissiper toute confusion sémiologique, nous réservons le terme « kératocône suspect » aux formes objectivement « suspectes », c'est-à-dire positives pour le test (ou franchissant un seuil) de « suspicion de kératocône » en

topographie spéculaire, selon les critères validés (critères de Rabinowitz, critères de Klyce et Maeda) : une forme suspecte de kératocône est ainsi synonyme de « Placido-suspecte » (Tab. 11.1).

Le terme de « forme fruste » désigne les formes topographiques qui n'éveillent pas ou peu de suspicion, mais dont on sait qu'elles présentent une forme mineure de la maladie : soit parce que ses anomalies topographiques (Placido) sont trop minimes, c'est-à-dire en deçà des seuils de détection admis pour le « kératocône suspect » mais qu'il existe d'autres anomalies topographiques ou tomographiques (épaisseur) évocatrices, soit que le contexte clinique est évocateur. Par exemple, chez un patient présentant un œil atteint de kératocône, si la cornée de l'autre œil présente un test négatif fondé sur les données de topographie spéculaire, cette cornée peut être considérée comme atteinte d'une forme fruste de kératocône, même si l'expression phénotypique du « kératocône » est trop faible de ce côté pour être détectable selon ces mêmes critères. De même, l'évolution vers une forme avérée de kératocône à partir d'une cornée qui était initialement jugée « normale » (« Placido-négative » pour le kératocône) peut faire requalifier *a posteriori* l'examen initial comme celui d'une forme fruste de kératocône. L'existence d'une documentation topographique précise pour de telles situations cliniques est précieuse car elle permet la définition de nouveaux seuils ou critères (indices). L'étude des propriétés biomécaniques de ces cornées (hystérèse) est une piste alternative prometteuse pour aider au dépistage précoce du kératocône infraclinique [14].

Il faut bien sûr garder à l'esprit que ces distinctions nosologiques ne sont pas immuables : la terminologie usitée dépend de la qualité des tests utilisés et pourra de fait varier dans le temps, ou avec la plateforme topographique utilisée. Quelles que soient les avancées dans ce domaine, le stade de « kératocône suspect » demeurera par définition topographiquement plus avancé que le stade de kératocône fruste, mais c'est ce dernier que les indices de dépistages proposés pour faciliter l'identification des formes précoces de kératocône devront traquer.

# Indices topographiques

## Généralités

Un indice (ou index) topographique est une valeur numérique calculée à partir de l'analyse des données recueillies par le topographe. Les indices topographiques permettent d'exploiter de manière plus quantitative les informations topographiques, et servir de variables explicatives pour réaliser des tests statistiques destinés à séparer la population des cornées présentant un kératocône infraclinique des cornées normales (analyse discriminante). La kératométrie simulée moyenne (Sim-K) est un exemple d'indice topographique, car outre l'estimation de la puissance kératométrique apicale moyenne qu'elle fournit, ce paramètre peut être indicatif de la présence d'un kératocône quand il atteint certaines valeurs (ex : 53 D). La plupart des indices ont d'ailleurs été initialement proposés pour faciliter le dépistage du kératocône, et leurs seuils définis à partir d'études préliminaires, ou intégrés dans des modèles statistiques prédictifs. D'autres champs d'applications existent, qui vont de l'étude de la qualité de l'examen topographique au dépistage de pathologies et conditions cornéennes variées (dégénérescence pellucide marginale, antécédent de chirurgie photoablative, etc.).

## Catégories d'indices

On peut classer les différents indices en fonction du type de données qui servent à les calculer :

– indices globaux : ils sont calculés à partir de l'ensemble des données topographiques de la surface cornéenne étudiée (ex : facteur Q d'asphéricité) ;
– indices locaux : ils sont calculés à partir de données topographiques partielles/locales (ex : indice I-S) ;
– indices composites : ils sont calculés à partir de la valeur de plusieurs indices (ex : KISA %).

Les premiers indices proposés pour la détection du kératocône étaient locaux [5], mais étant donné leur manque de spécificité quand les seuils choisis les rendaient sensibles, les indices proposés ultérieurement ont été de nature composites (ex : KISA %) [15].

En l'absence de standardisation entre les différents fabricants, type de cartes, échelles, etc., la majorité des indices (en particulier les indices composites) sont spécifiques à un modèle de topographe donné. Certains indices, développés par des investigateurs indépendants, sont toutefois communs entre les différentes plateformes topographiques.

## Sensibilité et spécificité des tests de dépistage

La mise au point de techniques de dépistage performantes vise à pallier le problème posé par la détection des formes précoces de kératocône. Pour apprécier leur

Tableau 11.1
Distinctions nosologiques des différents kératocônes

| | Cornées saines | Kératocône fruste | Forme suspecte de kératocône | Kératocône avéré |
|---|---|---|---|---|
| Signes cliniques ou biomicroscopiques | Non | Non | Non | Oui |
| Détection par topographie spéculaire | Non | Non | Oui | Oui |
| Détection par topographie d'élévation et pachymétrie | Non | Oui | Oui | Oui |

efficacité, c'est-à-dire leur capacité à dépister les kératocônes débutants, et les séparer des cornées saines, divers indices peuvent être étudiés dans une population de cornées dont on sait qu'une partie est atteinte de kératocône à un stade peu avancé, l'autre étant indemne de cette affection. C'est ainsi qu'a lieu la réalisation de ces tests de dépistage topographique, grâce à un groupe de patients dont on sait qu'il présente l'affection à dépister, et pour lequel on peut choisir des variables et un seuil.

Devant un examen topographique, considérer de manière isolée les valeurs de certaines variables ne suffit pas à effectuer un tri de qualité entre cornées saines et cornées atteintes d'une forme infraclinique de kératocône. Le calcul de la moyenne d'un indice non composite particulier (ex : Sim-K) dans une population saine de référence peut être informatif car il fournit une idée synthétique sur la valeur centrale de ce paramètre. Cependant, il est également essentiel de connaître une valeur de dispersion (ex : écart-type) qui mesure, d'une certaine manière, l'homogénéité du groupe par rapport à cet indice. On peut ensuite comparer cette moyenne et cet écart-type avec ceux d'une population de cornées pathologiques. On remarque alors que dans le cas de la comparaison entre cornées saines et atteintes de formes débutantes de kératocône, même si les moyennes sont distinctes, il existe un chevauchement important des valeurs pour n'importe quel indice. Il est licite de postuler que cette superposition de valeurs est encore plus importante pour les formes très débutantes, qui correspondent aux stades les plus précoces de l'affection.

De fait, même s'il existe une différence dite « statistiquement significative » entre les valeurs de l'indice mesuré pour les deux groupes, la véritable question à laquelle on doit répondre est : quelle valeur seuil choisir pour cet indice si l'on souhaite diagnostiquer la présence d'un kératocône débutant ? Si l'on choisit une valeur trop élevée, on risque de « laisser passer » un nombre important de cornées pathologiques (augmentation du nombre de faux négatifs, réduction de la sensibilité). Le choix d'une valeur trop basse expose au risque inverse : considérer comme pathologiques des cornées pourtant normales (augmentation du nombre de faux positifs, réduction de la spécificité).

En regroupant un certain nombre d'indices au sein d'une fonction dite « discriminante », on peut arriver à « faire un tri » plus efficace qu'à partir d'un indice unique : ce tri est appelé « analyse discriminante prédictive ». Cette technique statistique vise à prédire l'appartenance à des groupes prédéfinis d'un ensemble d'individus, à partir d'une série de variables prédictives (ici les indices topographiques, sous formes de valeurs chiffrées). À partir de combinaisons linéaires de ces variables prédictives, on obtient un score final. La valeur de ce score est comparée à un seuil, choisi adroitement pour discerner le plus possible les « individus » mesurés : par exemple « cornées normales » *vs* « kératocône ».

Aucun seuil n'est parfaitement discriminant : trop bas, il incrimine à tort une forte proportion de cornées normales comme pathologiques. Trop haut, il « laisse passer » un trop grand nombre de cornées pathologiques, considérées comme « normales » par erreur. Par exemple, on peut vouloir utiliser le degré de cambrure centrale de la cornée comme indice de la présence d'une forme débutante de kératocône. Fixer le seuil de la kératométrie simulée (Sim-K) à 45 D pour le dépistage du kératocône débutant risque d'aboutir à un diagnostic par excès de cette affection (sans la consolation de dépister tous les kératocônes débutants). Fixer le seuil du Sim-K à 49 D reviendrait à être certainement plus sélectif, mais moins sensible, un nombre important de cornées pathologiques n'étant pas considérées comme suspectes avec ce simple test. Pour accroître la capacité de discrimination, une solution consiste à ajouter une autre variable ; par exemple, en tenant compte de la valeur de l'asphéricité (Q) en plus de la valeur de la kératométrie simulée, on doit *a priori* mieux distinguer les formes débutantes de kératocône, qui sont caractérisées par une cambrure apicale augmentée, et une tendance à la décroissance de cette cambrure plus rapide vers les bords (asphéricité plus prolate).

D'une manière générale, en augmentant le nombre de variables, on obtient des tests plus performants, c'est-à-dire plus discriminants, pour lesquels le choix d'un seuil optimal est plus évident. C'est pour cela que les indices les plus performants sont composites (c'est-à-dire composés de plusieurs variables), afin d'augmenter la probabilité de bien séparer les populations infracliniques et normales avec les tests qui les utilisent.

Cependant, les techniques de statistique descriptive fondées sur le recueil et le calcul d'indices ne sont pas infaillibles car elles comportent toujours une proportion de patients dont les cornées pourront être mal classées. On parle de faux négatifs (FN) quand l'examen topographique est jugé (testé) normal, alors qu'il existe une forme débutante de kératocône, et de faux positifs (FP) quand l'examen topographique est jugé anormal, mais sans kératocône. Les cornées bien classées correspondent aux vrais négatifs (VN) en cas d'absence de kératocône, et aux vrais positifs (VP) en cas de kératocône.

Un bon test de dépistage est un test où le nombre de faux positifs et faux négatifs est assez faible pour que l'on puisse considérer ses résultats comme suffisamment fiables. La performance des examens utilisés pour le dépistage d'une pathologie quelconque peut être mesurée à l'aide des indices appelés sensibilité et spécificité (l'annexe située en fin de chapitre détaille les modalités qui permettent d'étudier les performances d'un test de dépistage).

## Sensibilité

La sensibilité est un critère qui décrit la capacité de détecter l'affection recherchée. Pour la mesurer, il faut disposer d'un groupe de malades (kératocône), sélectionné de manière indépendante du test que l'on cherche à analyser. La sensibilité est donnée par un pourcentage compris entre 0 et 100, qui est égal au rapport suivant :

$$\text{Sensibilité} = VP / (VP + FN)$$

0 % indique que l'examen ne détecte pas la pathologie recherchée ; 100 % indique que tous les cas pathologiques sont retrouvés (le test est constamment positif si le

sujet testé est atteint). Plus le test a une sensibilité élevée, moins il y aura de personnes ayant la pathologie recherchée qui ne seront pas détectées.

### Spécificité

La spécificité est un critère qui décrit, pour une pathologie donnée, la possibilité de déclarer la personne testée comme indemne de la pathologie recherchée. Elle correspond à la proportion de vrais négatifs sur l'ensemble des sujets sains.

$$\text{Spécificité} = VN / (VN + FP)$$

Plus la spécificité est élevée et proche de 1 (100 %), plus la proportion de faux positifs est faible et vice versa.

Une valeur de 100 % indique qu'une personne saine est identifiée avec certitude.

Le meilleur test de dépistage serait celui qui aurait une spécificité et une sensibilité chacune égale à 100 % (aucun faux positif, aucun faux négatif). Malheureusement aucun test en médecine n'a une parfaite exactitude et il existe pour chacun d'eux un certain nombre de résultats faux positifs ou faux négatifs.

Quand on souhaite minimiser les erreurs par défaut (il est moins grave de porter le diagnostic de kératocône débutant par excès que de laisser passer un kératocône fruste), on cherche à minimiser le nombre de faux négatifs. Ceci revient à formuler de manière plus savante que pour augmenter l'efficacité du dépistage du kératocône infraclinique avant chirurgie réfractive, la sensibilité des tests employés doit être suffisamment élevée, afin de ne pas « laisser passer » un mauvais candidat au Lasik (kératocône fruste) et risquer une ectasie en postopératoire (faux négatif). Cependant, il faut veiller à ce que la spécificité de ces tests ne devienne pas trop basse, sous peine de porter le diagnostic de kératocône débutant par excès, et de ne plus opérer de patients pourtant bons candidats !

Il convient de souligner enfin que si le diagnostic de kératocône repose sur l'examen topographique, d'autres éléments comme l'examen biomicroscopique, l'existence d'antécédents familiaux [16, 17] ou d'un terrain prédisposant [6, 18] (atopie, trisomie 21, etc.), une réfraction instable, l'existence de frottements digitaux répétés, des valeurs d'hystérèse diminuées et un aspect évocateur des signaux biomécaniques [19] peuvent aider à en étayer le diagnostic.

Ce chapitre se bornera à décrire les principes qui régissent le choix des indices topographiques et des tests de dépistage les plus courants. Ceux-ci reposent encore actuellement majoritairement sur l'utilisation des données qui découlent de la topographie spéculaire (Placido) et dépendent principalement de la face antérieure de la cornée. Ils permettent de diagnostiquer des formes dites « suspectes ». En fin de chapitre, un aperçu de l'intérêt potentiel de critères établis à partir de l'étude de l'épaisseur cornéenne et/ou de l'élévation postérieure sera présenté à la lumière d'études plus récentes, qui montrent que l'on peut accroître la sensibilité du dépistage du kératocône infraclinique et identifier des formes non dépistées par la topographie Placido (formes dites « frustes »).

## *Critères et tests de dépistage pour les formes suspectes de kératocône (kératocône suspect)*

Les critères topographiques initialement proposés par Rabinowitz pour l'identification rapide d'une forme suspecte de kératocône furent qualitatifs. Il est important de les rappeler, car ils ont été à l'origine de certains critères quantitatifs. Ces aspects sont présentés sur la Fig. 11.1 : ils furent décrits à partir des données recueillies chez des parents de patients atteints de kératocône [5], ou d'yeux que l'on savait (parfois rétrospectivement, après étude de topographies antérieures effectuées avant l'apparition de signes plus francs) atteints de formes débutantes de kératocône [20]. Le topographe utilisé était le TMS-1 avec une échelle absolue couvrant l'intervalle 35–50 D par pas de 1,5 D (soit 10 couleurs), les courbures situées en dehors de ces valeurs étaient représentées par pas de 5 D. Cette précision est importante, car il est primordial de souligner que les aspects topographiques évocateurs d'une forme suspecte pour le kératocône peuvent être gommés par une échelle trop large. La fiabilité de l'examen topographique (fixation adéquate) est par ailleurs essentielle pour interpréter correctement ces motifs.

L'existence d'un pattern AB/SRAX, associant un nœud papillon asymétrique (AB) et d'une angulation excessive des hémiméridiens les plus cambrés (SRAX) est fréquemment retrouvée (environ 80 %) sur l'image de topographie en courbure de l œil « sain » chez des patients atteints de kératocône « unilatéral ». Cet aspect représente un risque d'évolution vers une forme avérée supérieure à 50 %.

À ces aspects topographiques, une valeur de kératométrie centrale supérieure à 47,2 D et/ou une différence de kératométrie centrale supérieure à 1 D entre les deux yeux constituaient d'autres indices susceptibles d'évoquer la présence d'un kératocône fruste. Afin d'accroître leur spécificité (une proportion non négligeable de cornées indemnes de kératocône peut présenter un ou plusieurs de ces caractéristiques), d'autres éléments quantitatifs ont ensuite été proposés.

### Indice I-S

Cet indice utilise les données de la topographie spéculaire par disque de Placido. Il consiste à moyenner les valeurs kératométriques obtenues en différents points de l'hémicornée inférieure (I) et leur soustraire la moyenne correspondante pour les points correspondants de l'hémicornée supérieure (S) (Fig. 11.2). Le calcul de I est égal à la moyenne de 5 kératométries sur l'anneau des 3 mm centraux, à l'intersection des méridiens 210, 240, 270, 300 et 330°. Le calcul de S est effectué selon le même principe avec les méridiens 30, 60, 90, 120 et 150°. Une valeur seuil de 1,4 D a été retenue comme celle permettant de trancher entre asymétrie « physiologique » et présence d'un kératocône infraclinique. Une valeur supérieure à 1,9 D est couramment associée à une forme clinique de kératocône (amincissement visible à la lampe à fente, anneau de Fleischer, etc.). Afin

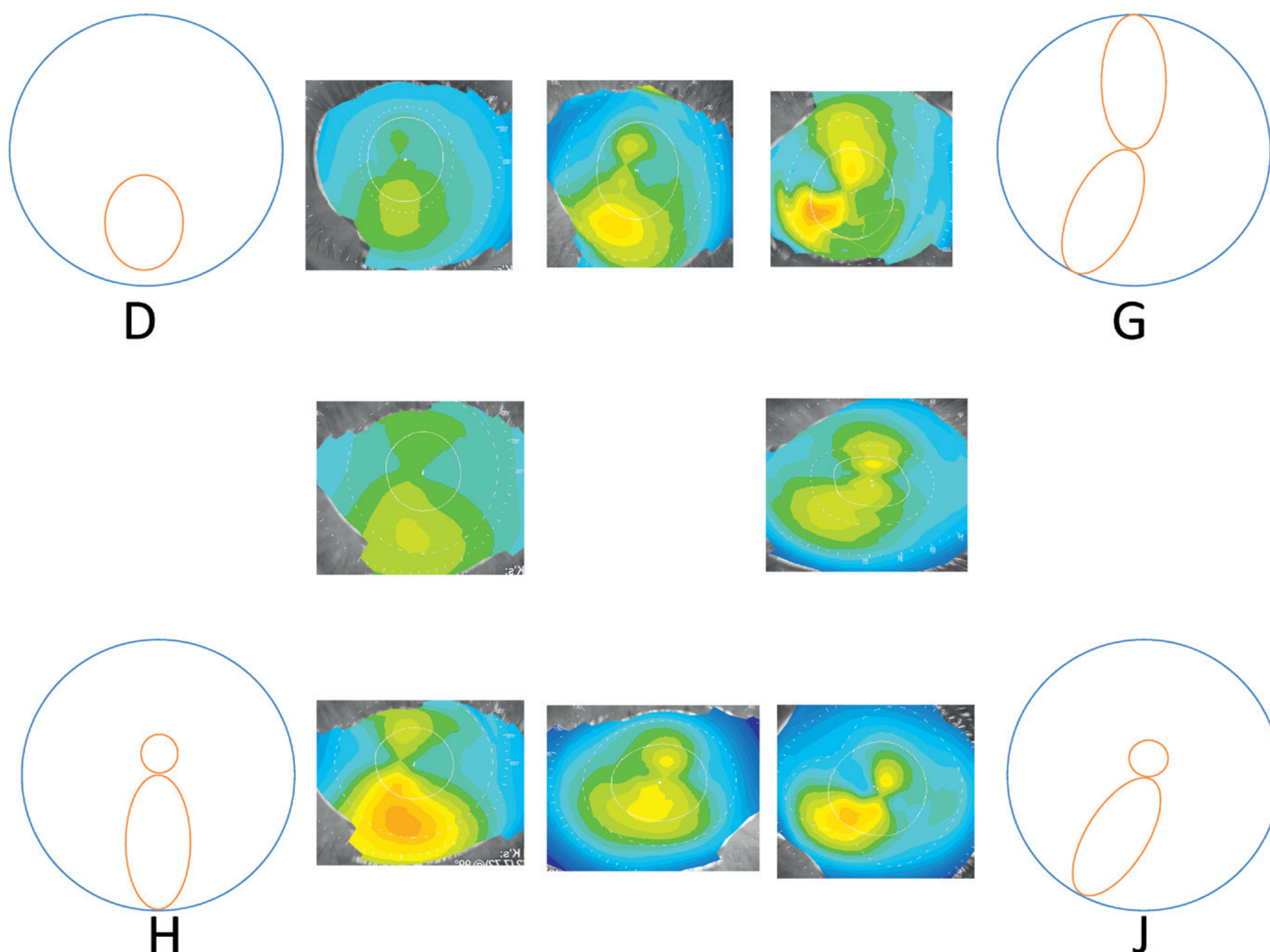



**Fig. 11.1.** ***Patterns schématiques et exemples correspondants (avec formes intermédiaires) de cornées « à risque » de forme infraclinique de kératocône selon Rabinowitz et al.***
*Ces aspects ont été obtenus en courbure axiale (topographie spéculaire antérieure), au moyen d'une échelle absolue, et désignés arbitrairement par une lettre de l'alphabet comprise entre A et J. Ici ne sont représentés que les aspects particulièrement suspects pour le kératocône débutant : D = aspect de cambrure accentuée isolée en inférieur ; G = angulation excessive des méridiens les plus cambrés ; H = « nœud papillon » asymétrique ; J = combinaison des formes G et H, ce pattern est désigné par l'acronyme AB/SRAX. Cet aspect est un facteur de risque d'évolution certain vers une forme avérée. Précisons que les îlots de couleur chaude ne correspondent pas à des « bosses », mais à des régions où la surface cornéenne antérieure présente une cambrure accentuée.*

d'accroître la sensibilité de ce critère, il est recommandé de placer un des points utilisés pour le recueil des valeurs kératométriques sur l'hémiméridien inférieur le plus cambré.

## Indice KISA %

Il a été développé par Rabinowitz et Rasheed [15]. Il repose sur l'utilisation de la valeur exprimée en degrés de l'angulation des deux hémiméridiens les plus bombés (SRAX) (Fig. 11.3), ainsi que des valeurs de la kératométrie maximale ôtée de 47 D, de l'astigmatisme kératométrique, et de la soustraction (I-S). La formule permettant le calcul de l'indice composite KISA % est :

$$\text{KISA\%} = K \times (I - S) \times \text{SRAX} \times 0{,}3$$

Avec : K = 1 si la kératométrie maximale est inférieure à 47 D, (I-S) = 1 si (I-S) < 1 et Ast = 1 si Ast < 1.

Selon Rabinowitz et Rasheed :

- KISA % < 60 : cornée normale ;
- 60 < KISA % < 100 : kératocône fruste ;
- KISA % > 100 : kératocône.

## Autres indices statistiques (topographie spéculaire)

La topographie spéculaire permet de calculer la puissance kératométrique locale en de nombreux points. À partir de ces valeurs, divers index peuvent être calculés, parfois pondérés par l'aire de la surface cornéenne qu'ils intéressent. Ces indices ont été initialement fournis par le topographe TMS-1 [21]. Voici une liste d'indices dont la valeur est susceptible d'être affectée par la présence d'un kératocône (le Tab. 11.2 rapporte les intervalles de valeurs normales et les seuils de valeurs suspectes, la Fig. 11.4 représente une interprétation graphique de certains indices).

### Indices liés au degré de toricité de la surface cornéenne

– Sim-K1/Sim-K2 : *Simulated Keratometry*/Kératométrie simulée

Puissances cornéennes des axes les plus cambrés et plus plats dans la zone des 3 mm.

– CYL : *Simulated Keratometric Cylinder*/Cylindre kératométrique simulé

Différence entre les valeurs de Sim-K1 et Sim-K2.

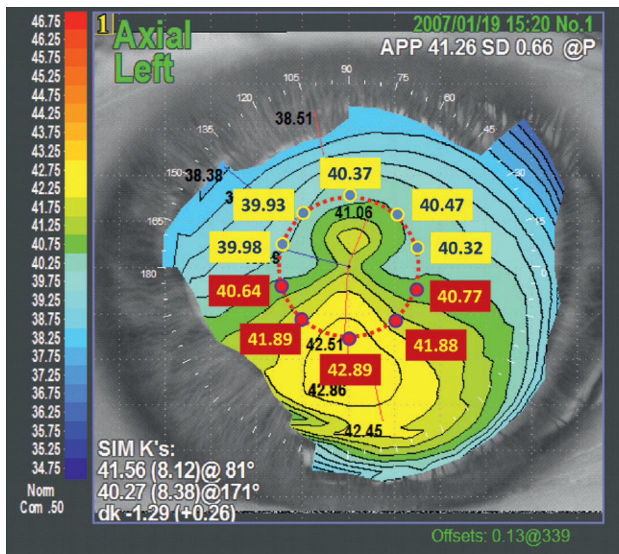



**Fig. 11.2.** ***Calcul de l'indice I-S : le diamètre du cercle centré sur le vertex est de 3 mm.***
*La moyenne des valeurs situées dans l'hémicornée supérieure est de S = 40,214 D. La moyenne des valeurs mesurées dans l'hémicornée inférieure est de I = 41,614 D. L'indice (I-S) est égal à 1,4 D. Malgré les chiffres de kératométrie légèrement inférieurs à la moyenne, l'indice (I-S) rend cette cornée suspecte de kératocône.*

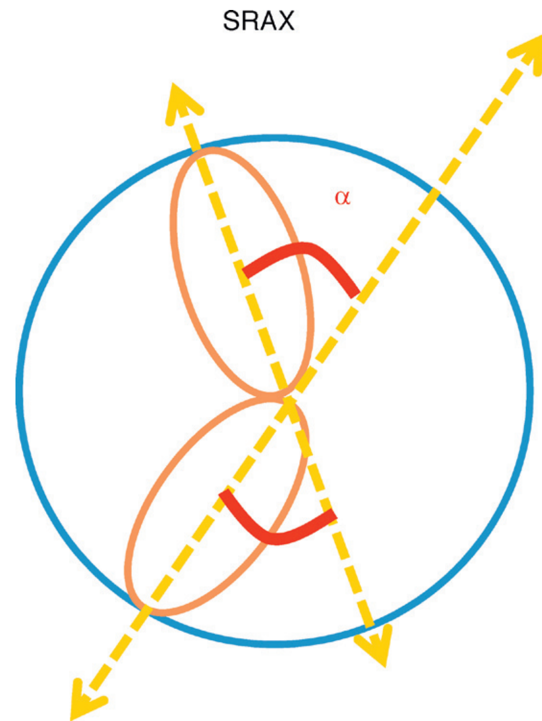



**Fig. 11.3.** ***Calcul du SRAX (ou déviation radiale des axes).***
*L'axe de l'hémiméridien de courbure maximum est identifié au sein de chaque hémicornée (supérieure, et inférieure). L'angle SRAX est l'angle le plus aigu formé par les directions de chaque hémiméridien. Cet indice est souvent déterminé « manuellement », mais il était également fourni par le logiciel équipant le topographe « Eyemap » (Alcon), qui était équipé d'un disque de Placido de 22 anneaux. Le SRAX reflète indirectement le caractère « partial » des mesures de courbures axiales. Ce motif disparaît de la représentation de la courbure moyenne ou gaussienne.*

## Indices liés au degré de fluctuation de puissance kératométrique

– CVP : *Coefficient of Variation of corneal Power*/Coefficient de variation de la puissance cornéenne

Étendue de la distribution des puissances kératométriques présentes sur la surface analysée autour de la moyenne :

CVP = 1 000 × (déviation standard de la puissance cornéenne totale (SDP)/ moyenne de la puissance cornéenne totale).

– SDP : *Standard Deviation of corneal Power*/Déviation standard de la puissance cornéenne

Valeur de la déviation standard de la puissance cornéenne totale.

– AA : *Analyzed Area*/Surface analysée

Valeur de la surface cornéenne couverte par les mires ayant pu être analysée. Elle peut être réduite en cas de kératocône avancé (déformation excessive des mires).

## Indices liés au degré d'asphéricité de la surface cornéenne

– CEI : *Corneal Eccentricity Index*/Index d'excentricité de la cornée

Il correspond à la valeur calculée de l'excentricité de la cornée. Cette excentricité devient de plus en plus prolate en cas de déformation kératocônique.

## Indices liés au degré d'asymétrie et d'irrégularité de la surface cornéenne

– DSI : *Differential Sector Index*/Index de différence sectorielle

La surface cornéenne est divisée en 8 parts égales (secteurs), dont l'angle interne balaye 45°. La puissance kératométrique axiale moyenne est calculée pour chaque secteur. L'indice DSI est égal à la différence maximale entre n'importe lesquels de ces secteurs. Sa valeur augmente en cas de cambrure asymétrique.

– SRI : *Surface Regularity Index*/Index de régularité de surface

Le SRI est corrélé à l'indice PVA (*Potential Visual Acuity*), car il correspond aux irrégularités locales de la surface cornéenne. Il est calculé comme la sommation de la fluctuation de la puissance locale le long de 256 hémiméridiens régulièrement espacés, sur les 10 mires centrales. Toute affection responsable d'une réduction de la régularité de la surface cornéenne induit une augmentation de la valeur de cet indice.

– SRC : *Area Compensated Surface Regularity Index*/Indice de régularité compensé pour la surface

Cet indice est calculé comme un SRI normalisé selon l'aire de la surface analysée. Il augmente pour les mêmes raisons que le SRI.

– SAI : *Surface Asymetry Index*/Index d'asymétrie de surface

Le SAI est une mesure qui intègre la différence de puissance kératométrique entre des paires de points opposés deux à deux et situés sur 128 méridiens.

– IAI : *Irregular Astigmatism Index*/Index d'astigmatisme irrégulier

L'IAI est fonction de la variation de puissance kératométrique d'anneau en anneau le long d'un méridien donné.

– OSI : *Opposite Sector Index*/Index de secteur opposé
La surface cornéenne est divisée en 8 secteurs égaux, dont l'angle interne est égal à 45°. La puissance moyenne de chaque secteur est calculée, et l'OSI est égal à la différence maximale mesurée entre deux secteurs opposés. Sa valeur augmente en cas d'astigmatisme irrégulier caractérisé par la présence d'un degré important d'asymétrie

Tableau 11.2
Valeurs normales et seuils de valeurs suspectes des indices de topographie spéculaire

| Indice | Intervalle de normalité | Intervalle de suspicion |
|---|---|---|
| Sim-K1 (D) | ]40,85–47,92[ | ]39,09–40,85]<br>[47,92–49,68[ |
| Sim-K2 (D) | ]39,65–45,25[ | ]38,24–39,65]<br>[45,25–46,65[ |
| MinK (D) | ]39,48–45,30[ | ]38,03–39,48]<br>[45,30–46,75[ |
| CYL (D) | < 1,43 | [1,43–1,78[ |
| CVP | < 27,33 | [27,33–32,21[ |
| SDP (D) | < 1,19 | [1,19–1,40[ |
| AA (%) | > 66,76 | ]59,76–66,76] |
| CEI | ]0,07–0,71[ | ]-0,09–0,07]<br>[0,71-0,88[ |
| DSI | < 2,98 | [2,98–3,44[ |
| SRI | < 0,70 | [0,70–0,89[ |
| SRC | < 0,77 | [0,77–0,97[ |
| SAI | < 0,54 | [0,54–0,62[ |
| IAI | < 0,50 | [0,50–0,54[ |
| OSI | < 1,79 | [1,79–2,21[ |
| CSI | ]-0,10–0,67[ | ]-0,29–0,10]<br>[0,67–0,86[ |
| KPI | < 0,21 | [0,21–0,23[ |

– CSI : *Center-Surrounded Index*/Index centre – périphérie
Le CSI est la différence entre la courbure axiale moyenne dans les 3 mm centraux, et celle calculée dans l'anneau périphérique (de 3 à 6 mm).

Afin de permettre l'utilisation de ces index de manière statistique pour le dépistage du kératocône, certains ont été regroupés dans une fonction appelée KPI (*Keratoconus Prediction Index*, index de prédiction du kératocône) : il s'agit d'une fonction discriminante calculée à partir des valeurs obtenues pour les index suivants : Sim-Kl, Sim-K2, SAI, DSI, OSI, CSI, IAI, AA, décrite dans l'article : Maeda N, Klyce SD, Smolek MK, Thompson HW : Automated keratoconus screening with corneal topography analysis. In*vest Ophthalmol Vis Sci* 1994 ; 35 : 2749–57.

## Dépistage automatisé des formes suspectes de kératocône

Les indices calculés sont autant de données quantitatives qui peuvent être utilisées pour construire des modèles statistiques destinés à séparer en groupes diagnostiques les cornées testées. Le logiciel du topographe TMS-1 (Tomey) dispose des critères de Rabinowitz (KISA %) et de Klyce et Maeda ; la Fig. 11.5 fournit un exemple où les critères de Rabinowitz concluent à la présence d'une forme suspecte de kératocône, contrairement aux critères de Klyce et Maeda. Cet exemple souligne l'absence de sensibilité et de spécificité absolues des tests de dépistage. En plus du logiciel du topographe TMS, les indices définis ci-dessus sont ainsi utilisés dans le programme informatique «Corneal Navigator», implémenté dans le logiciel OPDstation (topographe *OPDscan*, topographe *Magellan*, Nidek, Japon). À partir des valeurs calculées de tous les index mentionnés dans ce paragraphe précédent, un pourcentage de similitude avec une des conditions cliniques suivantes est présenté : normale (NRM), astigmatisme (AST), kératoône suspect (KCS), kératocône (KC), dégénérescence pellucide marginale (PMD), chirurgie cornéenne de la myopie (MRS), chirurgie cornéenne de l'hypermétropie (HRS), forme indéterminée (OTH) (Fig. 11.6).

Alio *et al.* ont étudié l'analyse des aberrations de haut degré (HOA) de la surface cornéenne antérieure comme

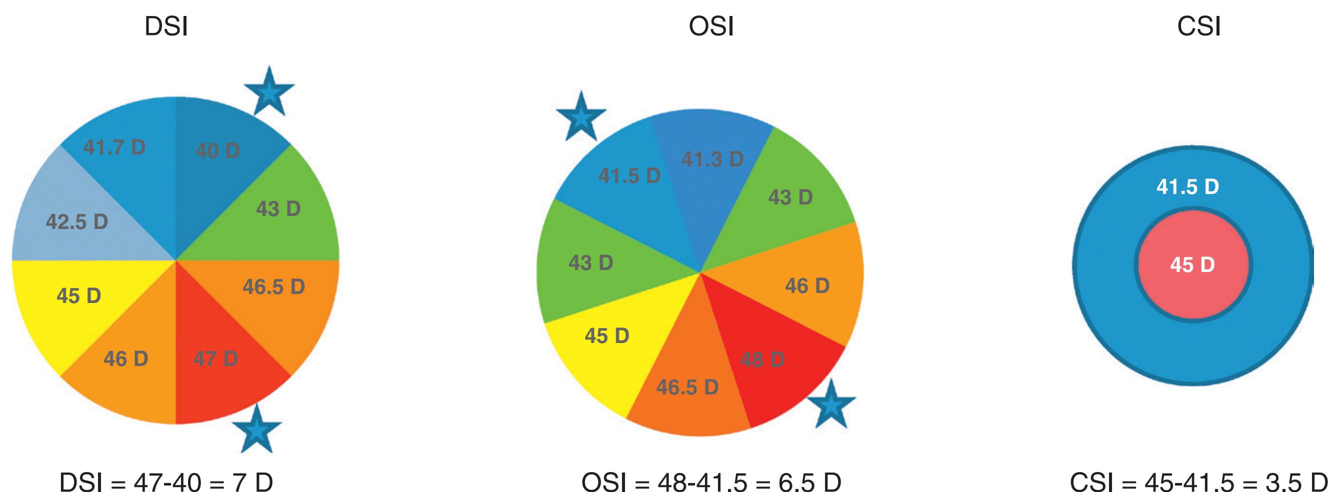



**Fig. 11.4. Calcul des indices DSI, OSI et CSI.**
*La surface cornéenne est divisée en 8 secteurs arbitraires (45° chacun). La courbure axiale moyenne est calculée au sein de chaque secteur. Le calcul est répété en changeant l'orientation de chaque secteur jusqu'à balayer l'ensemble des découpages possibles (par exemple, si la kératométrie est analysée sur des points distribués selon 256 hémiméridiens, il y aura 256/8 = 32 découpages possibles). L'indice DSI correspond à la différence maximale entre n'importe quels secteurs. L'OSI correspond à la différence maximale entre deux secteurs opposés. Le CSI est la différence de moyenne kératométrique entre les 3 mm centraux et l'anneau compris entre les 3 et 6 mm.*

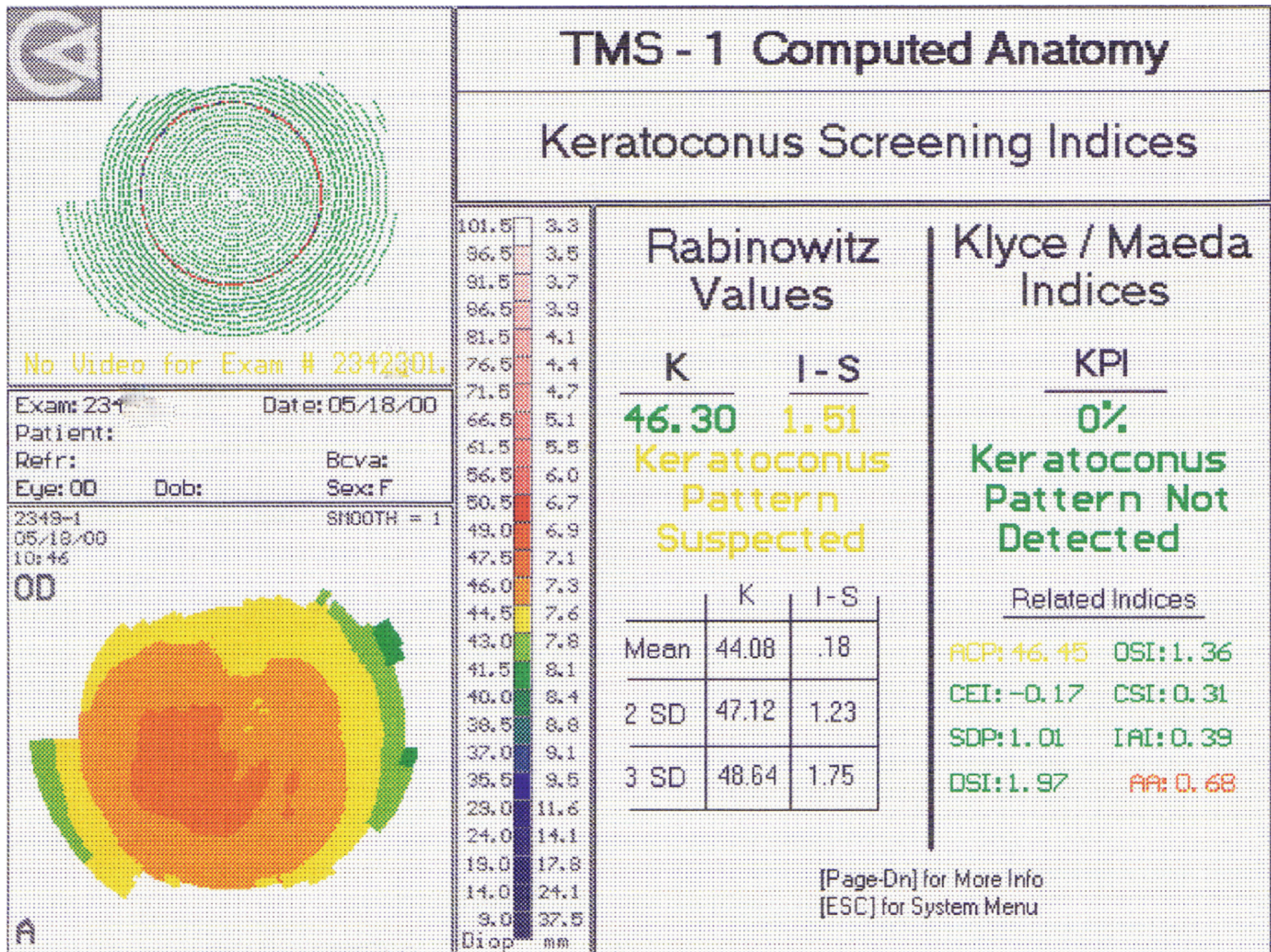



**Fig. 11.5.** ***Carte topographique en mode axial et indices de dépistage du kératocône fournis par le topographe TMS-1.***
*Il existe une augmentation de la courbure en paracentral inférieur. L'indice (I-S) est positif pour le kératocône suspect (1,51 > 1,4) : cette cornée est suspecte selon les valeurs proposées par Rabinowitz. Malgré les valeurs élevées de certains indices (ACP :* Average Corneal Power, *AA), l'indice composite KPI est négatif pour le kératocône. Malgré ces avertissements, cet œil fut opéré par Lasik, et une ectasie survient en postopératoire, confirmant* a posteriori *la présence d'une forme suspecte de kératocône.*

outil pour évaluer la sévérité d'un kératocône en utilisant la vidéokératoscopie avec analyse des cartes cornéennes antérieures [22]. Ils ont trouvé que les HOA cornéennes antérieures, notamment les aberrations de type coma, étaient significativement plus importantes dans les yeux porteurs d'un kératocône que dans les yeux normaux. Les aberrations de type coma pourraient ainsi être de bons indicateurs pour la détection précoce et l'évaluation du kératocône. Le choix d'un seuil et les valeurs correspondantes de sensibilité et spécificité n'étaient pas rapportés, limitant pour l'instant l'intérêt de cette approche pour l'aide au dépistage des formes suspectes.

## Dépistage du kératocône fruste en topographie d'élévation et pachymétrie optique

Les technologies permettant de réaliser une carte pachymétrique globale, avec « *mapping* de la face postérieure », sont certainement susceptibles d'apporter des éléments utiles au diagnostic des formes infracliniques très débutantes de kératocône. En effet, les éléments (variables ou indices) retrouvés anormaux chez les patients atteints de formes avérées de kératocône y sont nombreux [23] : augmentation des valeurs d'élévation maximale antérieure et surtout postérieure vis-à-vis de leurs *Best Fit Spheres* respectives, amincissement cornéen central ou paracentral, avec déplacement inféro-temporal du point le plus fin, etc. Nous avons montré qu'il existait une élévation maximale postérieure centrale accrue, une asphéricité postérieure plus prolate, et une moindre corrélation entre les surfaces antérieures et postérieures de la cornée chez les patients atteints de formes suspectes de kératocône (la suspicion était fondée de manière objective sur le recueil de données issues de la topographie spéculaire Placido) [12]. L'élévation postérieure maximale dans les 1 mm centraux était de 28,8 ± 10,2 µm pour les formes suspectes, contre 20,6 ± 8,9 µm pour les cornées normales.

Les formes suspectes de kératocône sont par définition des formes où l'atteinte de la face antérieure de la cornée est suffisamment marquée pour qu'elle éveille la suspicion ; dans ce contexte, l'apport de données

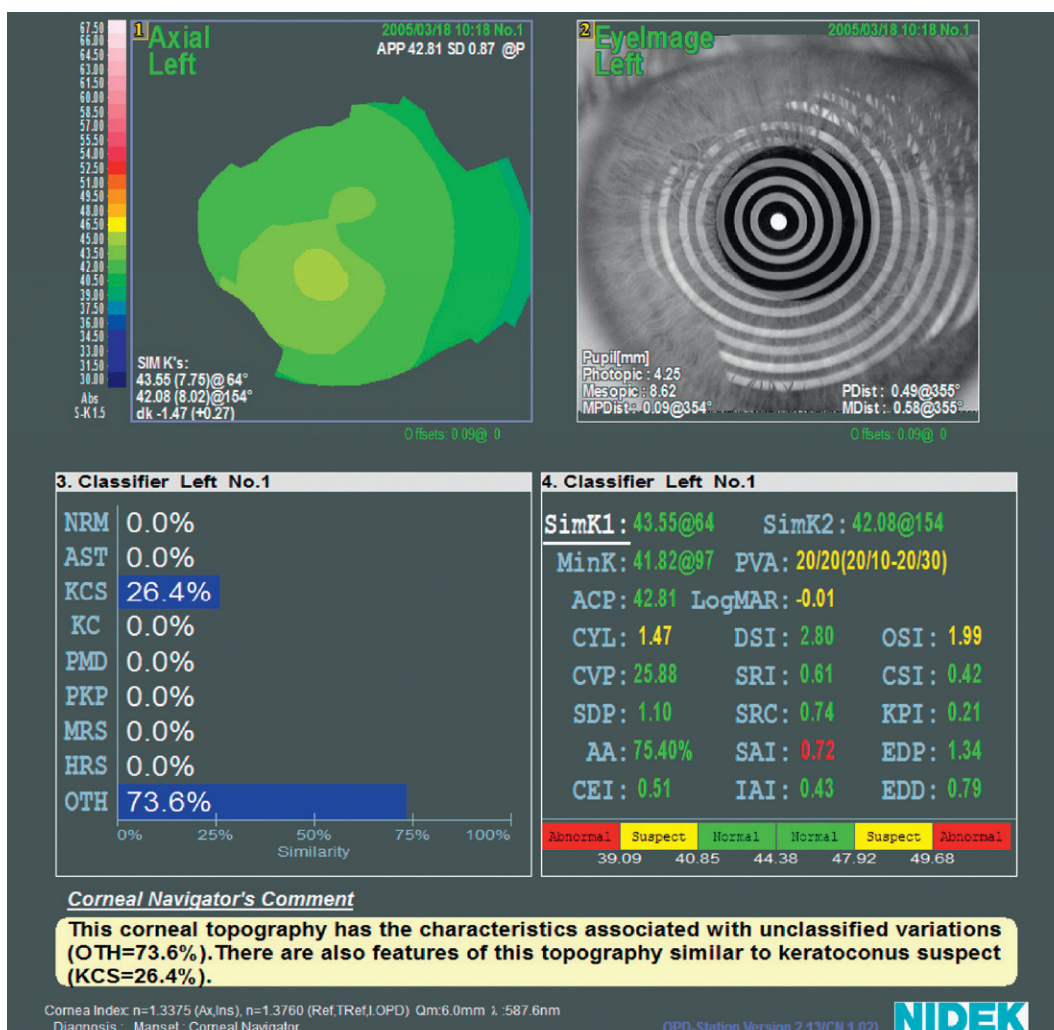



**Fig. 11.6.** ***Exemple du rapport utilisant les indices topographiques de Klyce et Maeda.***
*Les indices donc les valeurs sont suspectes sont en jaune, ceux qui sont franchement pathologiques en rouge (ici le SAI). Après analyse de ces indices par un réseau neuronal, un pourcentage de similitude avec une condition particulière est fourni (26,4 % pour une forme suspecte de kératocône dans cet exemple).*

issues de la face postérieure de la cornée ne semble pas contribuer de manière significative à l'augmentation de la sensibilité du dépistage du kératocône débutant [24, 25]. Cependant, le véritable enjeu pour la topographie d'élévation est d'offrir une plus grande sensibilité pour le dépistage des formes frustes car elles ne sont pas détectées par les techniques actuelles de topographie spéculaire, mais exposent à un risque certain d'ectasie post-Lasik. *Le kératocône fruste est alors considéré comme un faux négatif pour les tests de dépistage par topographie spéculaire (Placido) des formes suspectes (Fig. 11.7).*

Comment étudier les caractéristiques topographiques des yeux atteints de *formes frustes* (définies comme Placido-négatives mais atteintes) de kératocône ? En théorie, on pourrait analyser de manière rétrospective les cartes topographiques les plus anciennes d'yeux qui finissent par présenter un kératocône avéré, dans l'espoir d'y retrouver les prémices de cette affection. Malheureusement, il est rare que ces patients aient bénéficié d'une topographie cornéenne alors qu'ils étaient asymptomatiques. Un autre modèle clinique peut être utilisé pour traquer les formes les plus débutantes du kératocône : nous avons réalisé une étude portant sur les yeux adelphes de patients atteints de « kératocône très asymétrique entre les deux yeux », c'est-à-dire avancé (forme clinique) sur un œil, et au maximum très débutant (infraclinique et Placido-négatif) sur l'autre [13] (Fig. 11.8). Dans notre modèle, l'œil le moins atteint n'était inclus que si les tests de dépistage issus de la topographie spéculaire Placido (critères de Klyce et Maeda) étaient négatifs, c'est-à-dire que la classification automatique par réseau neuronal (*Corneal Navigator*) fournissait des pourcentages de similitudes strictement nuls pour le kératocône avéré, le kératocône suspect et la dégénérescence pellucide marginale… alors que l'autre œil était testé positif pour le diagnostic de kératocône avéré. Ces cornées « Placido-normales » mais appartenant à un patient génotypiquement atteint de kératocône ont été étudiées en topographie d'élévation par balayage (Orsbcan), et comparées à un groupe témoin de cornées normales.

Dans ces yeux que l'on pouvait considérer comme atteints de formes frustes de kératocône (l'existence de formes strictement unilatérales de kératocône est déniée par la plupart des auteurs), de nombreux indices calculés à partir de l'élévation postérieure et de la pachymétrie étaient statistiquement différents de ceux mesurés chez

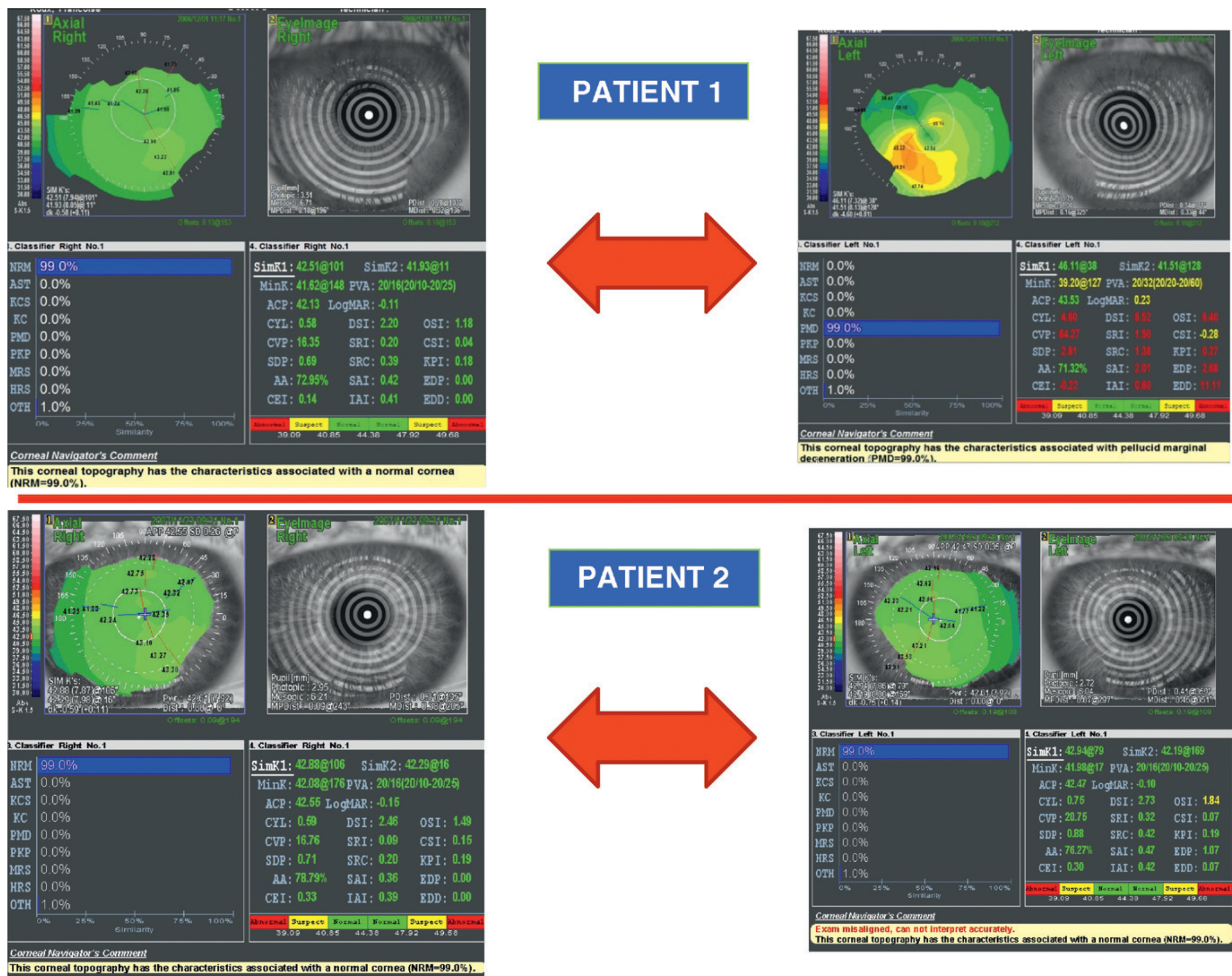



**Fig. 11.7.** ***Test de dépistage par topographie séculaire (Placido) des formes frustes.***
*Le patient 1 est atteint d'une forme dont l'expression entre les yeux droit et gauche est très asymétrique. Ce patient présente une forme avérée de kératocône de l'œil gauche, comme en attestent l'aspect de la carte topographique et les valeurs calculées pour les indices de Klyce et Maeda. À droite, le diagnostic automatisé effectué avec le réseau neuronal Corneal Navigator (Nidek) à partir de la carte spéculaire axiale (topographe OPDscan, Nidek) est négatif pour le KC et le KCS, le patient est asymptomatique (meilleure acuité visuelle corrigée : 12/10). On note une légère asymétrie marquée par une zone un plus cambrée en nasal inférieur, mais celle-ci est suffisamment minime pour que tous les indices calculés soient normaux. Le patient 2 est asymptomatique, et présente à droite comme à gauche une légère augmentation de la cambrure nasale inférieure. À droite, tous les indices sont normaux, à gauche, seul l'OSI est suspect, mais le réseau neuronal classe les deux cornées de ce patient comme NRM. La carte topographique de l'œil droit du patient 2 ressemble beaucoup à celle de l'œil droit du patient 1. Si l'on peut émettre un doute quant à la possibilité d'une forme fruste de kératocône pour les cornées du patient 2, on peut néanmoins affirmer la présence de cette affection au niveau de la cornée droite du patient 1. On peut définir et tester d'autres indices de dépistage pour ces formes frustes en recueillant les données issues de l'élévation et de la pachymétrie totale comme l'Orbscan pour ce type de cornées.*

des yeux normaux : l'épaisseur centrale moyenne était réduite (524,3 ± 35 *vs* 554,6 ± 36 µm), la différence entre cette valeur et celle du point le plus fin (*thinnest point*) était augmentée (12,1 ± 5,6 *vs* 6,8 ±3,1 µm), la distance au centre géométrique du point le plus fin augmentée (0,95 ± 0,37 *vs* 0,64 ± 0,32 µm), la valeur d'élévation postérieure vis-à-vis de la sphère de référence calculée après recentrement sur le point le plus fin était plus grande en regard de ce point (26,3 ± 11 *vs* 19,7 ± 8,6 µm).

Le gradient d'épaississement du mur cornéen vers la périphérie était accentué vis-à-vis des cornées normales : ceci peut être interprété de manière équivalente comme une vitesse d'amincissement plus rapide de la périphérie vers le centre du mur cornéen. Si les valeurs des courbures respectives des faces antérieure et postérieure n'étaient pas différentes entre les deux groupes, on pouvait toutefois mesurer une différence significative en termes de variation locale de ces courbures, qui était plus rapide (pente de progression plus forte en paracentral et moyenne périphérie) pour les cornées présentant un kératocône fruste. Un exemple de carte Orbscan d'une cornée atteinte de kératocône fruste est présenté à la Fig. 11.9.

Les moyennes calculées pour ces paramètres, bien que significativement différentes sur le plan statistique, sont trop proches par rapport à la distribution des valeurs observées pour qu'elles puissent, considérées de manière isolée, être réellement *cliniquement* significatives. Leur utilisation conjointe (réalisation d'un indice composite par une technique d'analyse discriminante) permet cependant d'obtenir un test diagnostique sensible et spécifique, où le choix d'un seuil optimal a permis d'obtenir une sensibilité de 93 % et une spécificité de 92 % pour le dépistage du kératocône fruste (Fig. 11.10). Nous avons utilisé un topographe où les données d'élévation et de

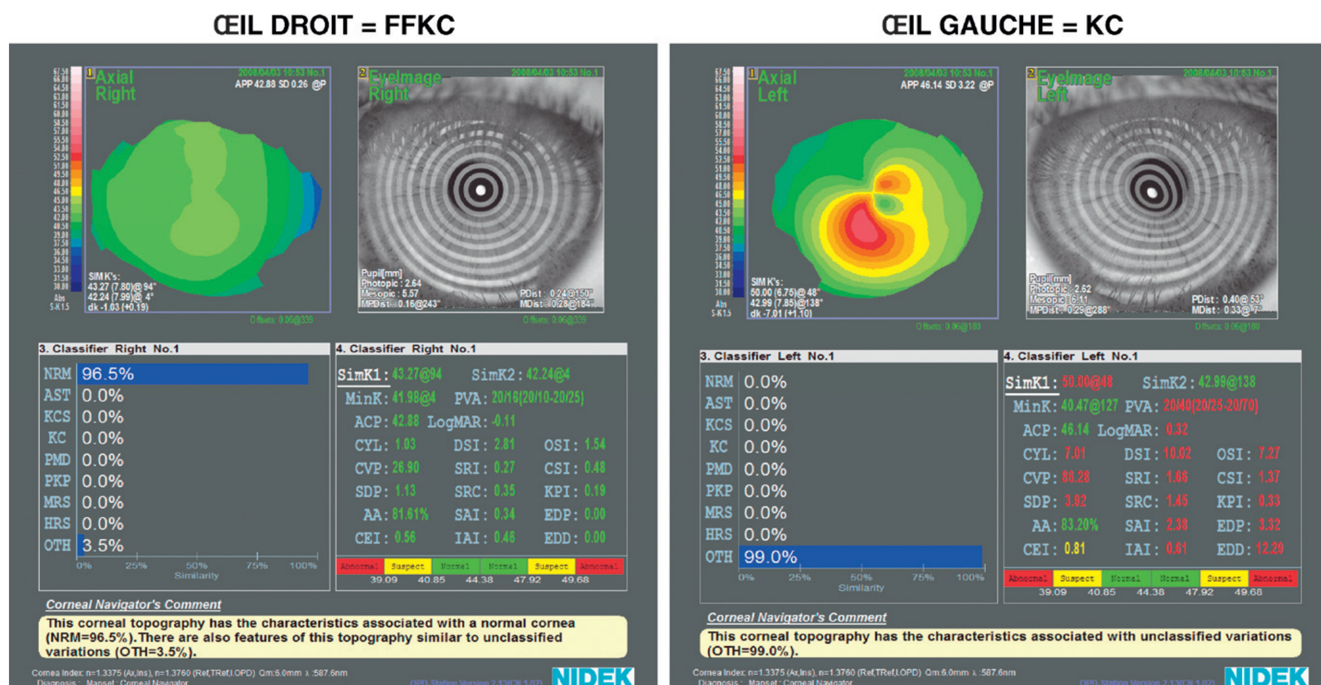



**Fig. 11.8.** ***Patient présentant un kératocône avéré de l'œil gauche, et une cornée jugée topographiquement normale par le réseau neuronal, selon les indices calculés de Klyce et Maeda (topographie spéculaire de Placido par OPDscan, Nidek).***
*L'œil droit est asymptomatique (meilleure acuité visuelle corrigée : 12/10). À l'interrogatoire, on retrouve la notion de terrain atopique, mais l'absence de frottements oculaires digitaux répétés. L'existence d'un kératocône évolué du côté gauche permet de considérer la cornée de l'œil droit comme présentant une forme infraclinique de kératocône. Cette forme infraclinique est nécessairement une forme fruste, car Placido-non suspecte.*

pachymétrie sont recueillies grâce à une technique de balayage par fentes lumineuses (Orbscan), et il est très probable que des résultats similaires auraient été obtenus au moyen d'autres techniques (imagerie par caméra Scheimpflug).

Le recours à des données pachymétriques et d'élévation n'est pas surprenant dans le cadre d'une pathologie où la cornée subit un amincissement dès les stades précoces [10, 11]. Cet amincissement central ou paracentral est forcément responsable d'une modification de la géométrie des surfaces antérieure et postérieure (il n'y aurait guère de raison qu'il n'ait d'effet que sur une seule surface). Nous avons effectué un travail de modélisation mathématique dont les résultats montrent que lorsque la géométrie d'une cornée normale subit une altération vers une forme débutante de kératocône comme l'accentuation de la cambrure apicale et de l'asphéricité prolate, les modifications de l'élévation postérieure apparaissent plus précocement avec les modes et échelles de représentation courants [26]. Ceci explique l'aspect plus « rouge » noté au centre des cartes d'élévation postérieures, fréquemment observé pour les cornées suspectes.

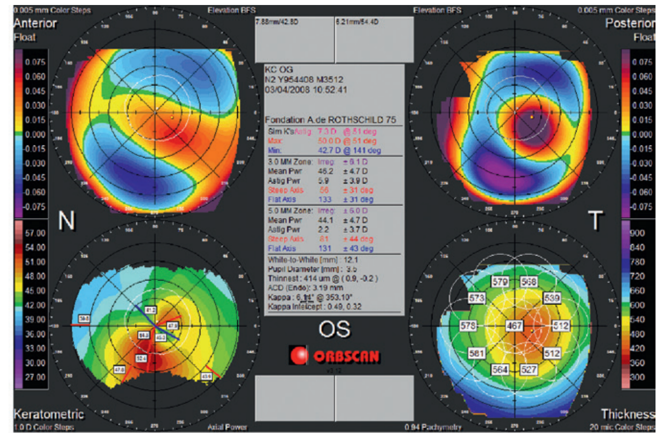
De plus, il existe une différence notable de plasticité entre la face antérieure et la face postérieure de la cornée. La face antérieure de la cornée est pourvue d'une couche pluristratifiée : l'épithélium cornéen. Nous avons émis l'hypothèse qu'un masquage épithélial, ou « relissage », pourrait tendre à normaliser la topographie antérieure (mais bien évidemment pas la topographie de la face postérieure). Nous avons été les premiers à réaliser *in vivo* une série de topographies Placido de la couche de Bowman, qui est la surface stromale acellulaire lisse et réflective, située juste sous l'épithélium cornéen [27]. L'examen était effectué seulement après avoir soigneusement retiré cet épithélium chez des patients opérés de PKR pour myopie. Dans presque tous les cas, la surface de la cornée sans son épithélium (partie superficielle de la couche de Bowman) adoptait une topographie plus évocatrice de kératocône suspect qu'avec : asphéricité plus prolate, toricité accrue et courbure plus irrégulière (Fig. 11.11).

# Conclusion

La topographie cornéenne est un l'outil de référence pour la détection des formes infracliniques de kératocône. La topographie spéculaire de Placido permet de dépister une partie de ces formes infracliniques (formes étiquetées comme Placido-suspectes), mais sa sensibilité et sa spécificité ne sont pas suffisantes pour s'abstenir du recueil des données de l'élévation et de la pachymétrie totale (tomographie).

Tous ces résultats convergents pour indiquer que le chirurgien soucieux d'accroître la sensibilité du dépistage du kératocône infraclinique en général et des formes frustes en particulier doit accorder de l'attention à l'examen de la face postérieure de la cornée et à son épaisseur, évaluée par l'examen de la distribution pachymétrique (tomographie). En attendant qu'un indice composite fondé sur des données d'élévation et de pachymétrie soit disponible en routine pour la distinction entre les formes frustes de kératocône et

ŒIL GAUCHE = KC




ŒIL DROIT = FFKC

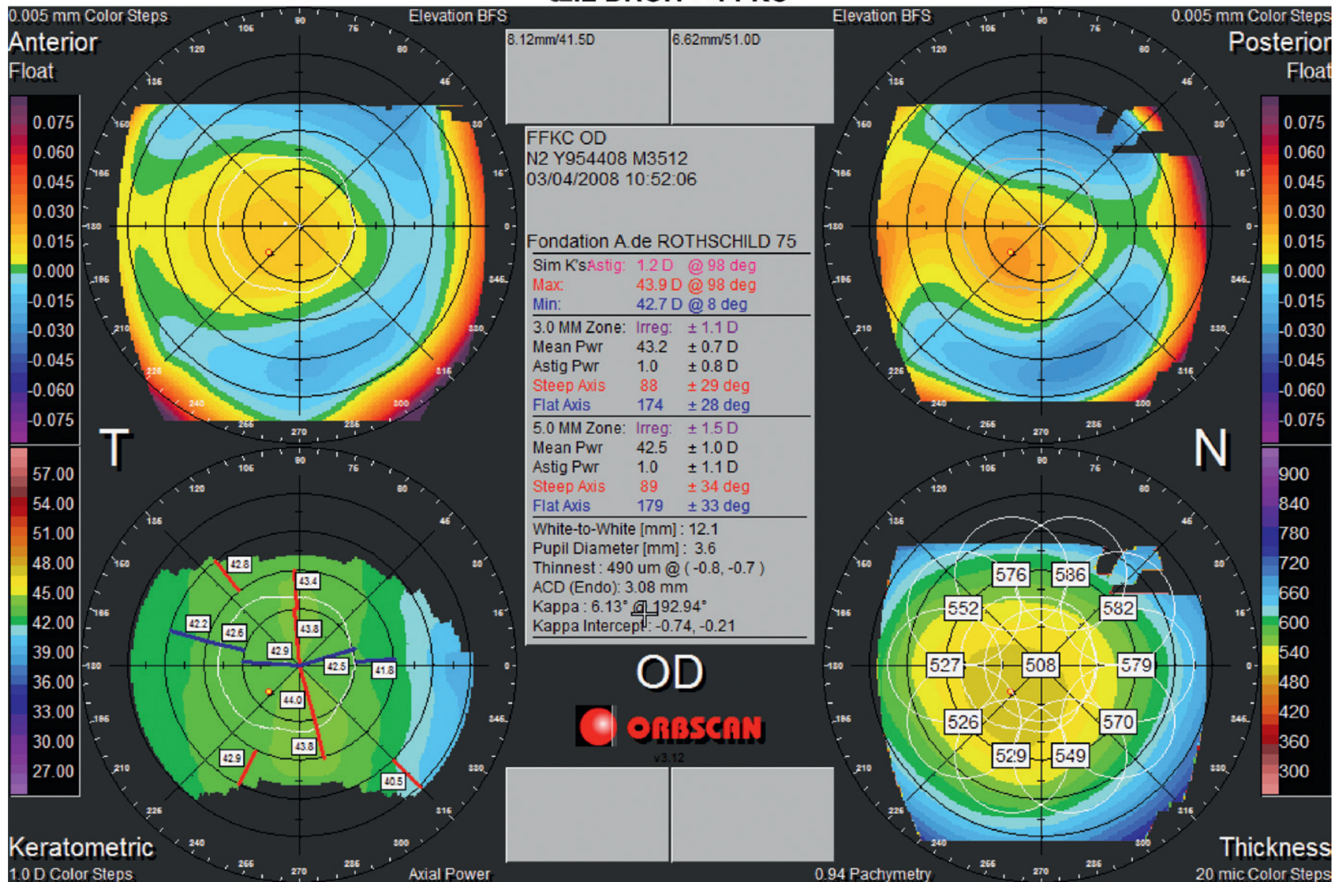



***Fig. 11.9.*** ***Représentation en mode*** **Quad Map** ***de la cornée droite présentant un kératocône fruste (FFKC) à la Fig. 11.7, alors que l'œil gauche présente un kératocône avéré (en haut à droite).***
*Sur la carte d'épaisseur (Thickness) de la cornée droite, on note l'amincissement paracentral rapide vers le point le plus fin, qui est décentré en temporal inférieur. La différence entre l'épaisseur moyenne centrale et le point le plus fin est 18 µm. Après recentrage sur le point le plus fin, l'élévation de la cornée en ce point vis-à-vis de la* Best Fit Sphere *est de 26 µm. Ces variables peuvent être utilisées pour bâtir un test statistique pour le kératocône infraclinique dans sa forme fruste.*

les cornées normales, une interprétation pertinente de l'ensemble des données topographiques pourra inciter à revoir une indication de Lasik devant la conjonction des signes suivants : anomalie détectée en topographie spéculaire évocatrice de forme suspecte de kératocône (indice de détection positif pour le kératocône suspect), et/*ou* amincissement cornéen rapide et accentué vers le centre, décentrement du point le plus fin, élévation cornéenne postérieure accrue sur le point le fin. Il est difficile de donner des valeurs seuils pour chacun de ces critères, qui considérés individuellement ne permettent pas de distinguer les formes frustes des cornées normales. Enfin, il est vraisemblable de postuler que l'étude plus exhaustive des caractéristiques topographiques d'élévation et de pachymétrie des cornées Placido-suspectes permettra dans certains cas de revoir le diagnostic de kératocône suspect et poser celui par exemple d'asymétrie congénitale, c'est-à-dire identifier les « faux positifs » aux tests topographiques spéculaires, en bref innocenter certaines cornées « Placido-suspectes ».

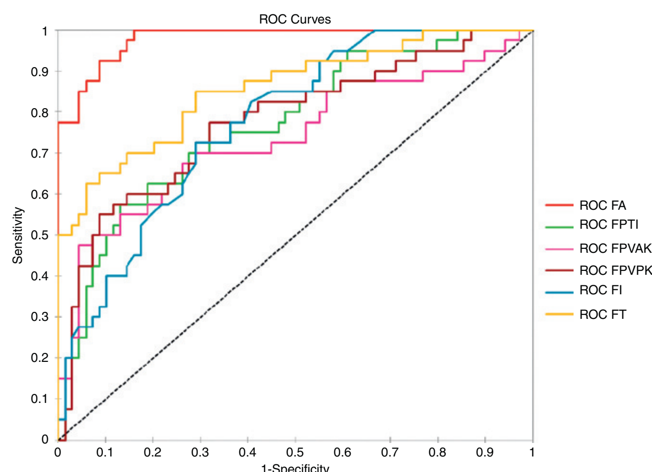
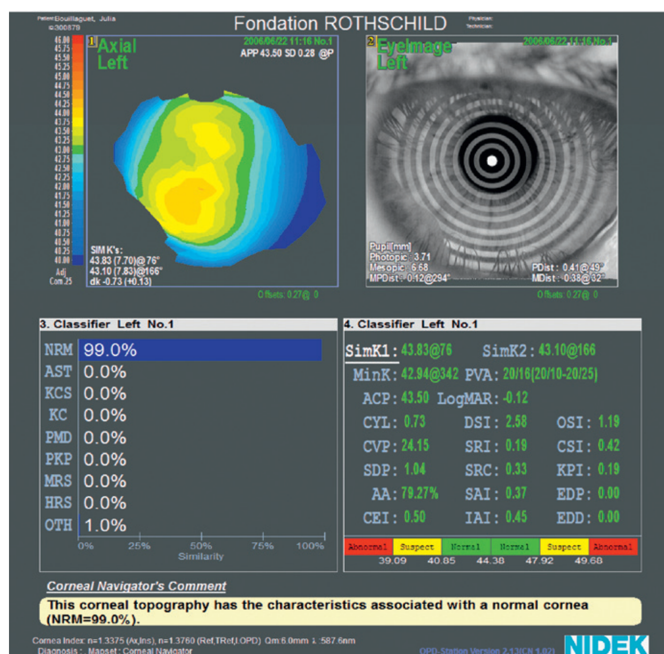



**Fig. 11.10.** *Courbes ROC (*Receiver Operating Characteristic*) pour différentes combinaisons d'indices topographiques et tomographiques pour le diagnostic de forme fruste de kératocône.*
*FA : tous les indices ; FT : élévation et décentrement sur le point le plus fin ; FPTI : pourcentage de variation de l'épaisseur cornéenne entre centre et bords ; FPVAK : pourcentage de variation de la courbure antérieure entre centre et bords ; FPVPK : pourcentage de variation de la courbure postérieure entre centre et bords ; FI : irrégularité antérieure à 3 et 5 mm. La fonction FA est la plus sensible et spécifique (Aire sous la courbe = 0,98). Le choix d'un seuil optimal permet d'obtenir une sensibilité de 92,5 %, et une spécificité de 92 %.*

Avant retrait épithélial

Après retrait épithélial



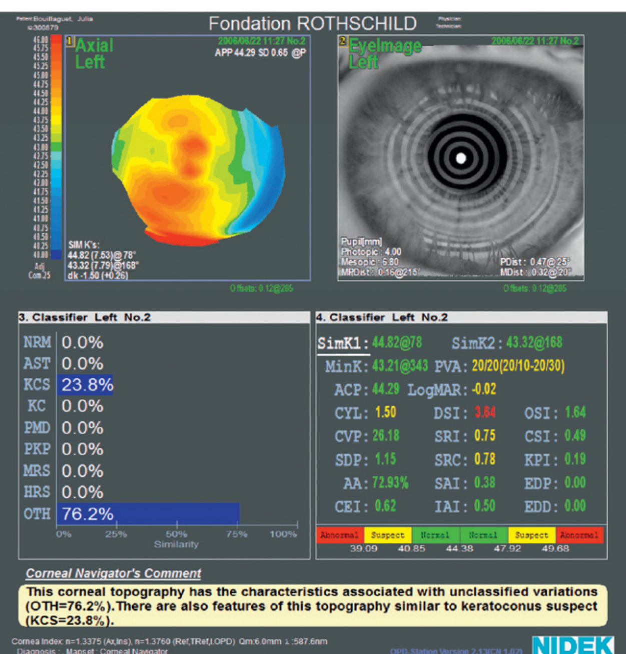




**Fig. 11.11.** *Topographies spéculaires axiales effectuées avant (à gauche) et après (à droite) retrait de l'épithélium cornéen au cours d'une procédure de photoablation de surface (PKR).*
*Avant retrait épithélial, on note une légère augmentation de la cambrure paracentrale inférieure. L'analyse par réseau neuronal suggère une surface cornéenne antérieure normale, et la valeur (I-S) — calculée manuellement — est estimée à 0,6 D. Après retrait épithélial soigneux et atraumatique, on obtient un reflet des mires de Placido de bonne qualité par la couche de Bowman où s'étale un film lacrymal de bonne qualité, permettant le calcul de la carte de courbure axiale de la couche stromale superficielle (interface Bowman/air). On note un aspect globalement plus cambré et irrégulier de la couche de Bowman, et l'augmentation de la valeur des indices CYL, DSI, SRI et SRC. Le réseau neuronal suggère maintenant la possibilité d'une forme suspecte de kératocône infraclinique. Cette observation n'est pas isolée et suggère que l'épithélium cornéen tend à estomper la toricité, l'irrégularité et l'asymétrie présente au niveau de la couche stromale superficielle de Bowman. Ce type de modification n'est pas possible au niveau de la face postérieure de la cornée, dépourvue d'une structure tissulaire pluristratifiée. Cette action de l'épithélium est suggérée de manière plus indirecte par la moindre corrélation retrouvée chez les cornées atteintes de formes suspectes entre les valeurs antérieures et postérieures de certains descripteurs (asphéricité, toricité), par rapport à ce que l'on mesure chez les cornées saines.*

**Références**


[1] Randleman JB, Trattler WB, Stulting RD. Validation of the Ectasia Risk Score System for preoperative laser in situ keratomileusis screening. Am J Ophthalmol 2008 ; 145 (5) : 813–8.

[2] Binder PS, Trattler WB. Evaluation of a risk factor scoring system for corneal ectasia after Lasik in eyes with normal topography. J Refract Surg 2010 ; 26 (4) : 241–50.

[3] Amsler M. The « forme fruste » of keratoconus. Wien Klin Wochenschr 1961 ; 8 : 842–3.

[4] Rabinowitz YS, McDonnell PJ. Computer-assisted corneal topography in keratoconus. Refract Corneal Surg 1989 ; 5 (6) : 400–8.

[5] Rabinowitz YS, Garbus J, McDonnell PJ. Computer-assisted corneal topography in family members of patients with keratoconus. Arch Ophthalmol 1990 ; 108 (3) : 365–71.

[6] Rabinowitz YS. Keratoconus. Surv Ophthalmol 1998 ; 42 (4) : 297–31.

[7] Rabinowitz YS. Tangential *vs* sagittal videokeratographs in the « early » detection of keratoconus. Am J Ophthalmol 1996 ; 122 (6) : 887–9.

[8] Smolek MK, Klyce SD. Current keratoconus detection methods compared with a neural network approach. Invest Ophthalmol Vis Sci 1997 ; 38 (11) : 2290–9.

[9] Rao SN, Raviv T, Majmudar PA, Epstein RJ. Role of Orbscan II in screening keratoconus suspects before refractive corneal surgery. Ophthalmology 2002 ; 109 (9) : 1642–6.

[10] Ambrósio R Jr, Alonso RS, Luz A, Coca Velarde LG. Corneal-thickness spatial profile and corneal-volume distribution : tomographic indices to detect keratoconus. J Cataract Refract Surg 2006 ; 32 (11) : 1851–9.

[11] Ambrósio R Jr, Klyce SD, Wilson SE. Corneal topographic and pachymetric screening of keratorefractive patients. J Refract Surg 2003 ; 19 (1) : 24–9.

[12] Schlegel Z, Hoang-Xuan T, Gatinel D. Comparison of and correlation between anterior and posterior corneal elevation maps in normal eyes and keratoconus-suspect eyes. J Cataract Refract Surg 2008 ; 34 (5) : 789–95.

[13] Saad A, Gatinel D. Topography and Tomography Properties of Forme Fruste Keratoconus Corneas. Invest Ophthalmol Vis Sci 2010 June 16.

[14] Saad A, Lteif Y, Azan E, Gatinel D. Biomechanical properties of keratoconus suspect eyes. Invest Ophthalmol Vis Sci 2010 ; 51 (6) : 2912–6.

[15] Rabinowitz YS, Rasheed K. KISA % index : a quantitative videokeratography algorithm embodying minimal topographic criteria for diagnosing keratoconus. J Cataract Refract Surg 1999 ; 25 (10) : 1327–35.

[16] Salabert D, Cochener B, Mage F, Colin J. Keratoconus and familial topographic corneal anomalies. J Fr Ophtalmol 1994 ; 17 (11) : 646–56.

[17] Levy D, Hutchings H, Rouland JF, Guell J, Burillon C, Arné JL, et al. Videokeratographic anomalies in familial keratoconus. Ophthalmology 2004 ; 111 (5) : 867–74.

[18] Jacq PL, Sale Y, Cochener B, Lozach P, Colin J. Keratoconus, changes in corneal topography and allergy. Study of 3 groups of patients. J Fr Ophtalmol 1997 ; 20 (2) : 97–102.

[19] Schweitzer C, Roberts CJ, Mahmoud AM, Colin J, Maurice-Tison S, Kerautret J. Screening of forme fruste keratoconus with the ocular response analyzer. Invest Ophthalmol Vis Sci 2010 ; 51 (5) : 2403–10.

[20] Li X, Rabinowitz YS, Rasheed K, Yang H. Longitudinal study of the normal eyes in unilateral keratoconus patients. Ophthalmology 2004 ; 111 (3) : 440–6.

[21] Maeda N, Klyce SD, Smolek MK, Thompson HW. Automated keratoconus screening with corneal topography analysis. Invest Ophthalmol Vis Sci 1994 ; 35 (6) : 2749–57.

[22] Alió JL, Shabayek MH. Corneal higher order aberrations : a method to grade keratoconus. J Refract Surg 2006 ; 22 (6) : 539–45.

[23] Kim H, Joo CK. Measure of keratoconus progression using Orbscan II. J Refract Surg 2008 ; 24 (6) : 600–5.

[24] Bühren J, Kook D, Yoon G, Kohnen T. Detection of subclinical keratoconus by using corneal anterior and posterior surface aberrations and thickness spatial profiles. Invest Ophthalmol Vis Sci 2010 ; 51 (7) : 3424–32.

[25] Bühren J, Kühne C, Kohnen T. Defining subclinical keratoconus using corneal first-surface higher-order aberrations. Am J Ophthalmol 2007 ; 143 (3) : 381–9.

[26] Gatinel D, Malet J, Azar ST. Corneal elevation topography : Best Fit Sphere, elevation distance, asphericity, toricity and clinical implications. Cornea 2010 ; in press.

[27] Gatinel D, Racine L, Hoang-Xuan T. Contribution of the corneal epithelium to anterior corneal topography in patients having myopic photorefractive keratectomy. J Cataract Refract Surg 2007 ; 33 (11) : 1860–5.

# *Annexe – Principes de réalisation et d'évaluation des tests diagnostiques pour le dépistage topographique du kératocône infraclinique*

Le dépistage du kératocône dans sa forme infraclinique (KIC) repose principalement sur la topographie cornéenne. C'est un enjeu majeur, parce qu'un KIC peut évoluer vers un kératocône avéré de manière spontanée, ou après chirurgie cornéenne (Lasik). La présence d'un KIC constitue d'ailleurs une contre-indication formelle au Lasik, qui est une des techniques chirurgicales les plus réalisées au monde. Le dépistage automatisé du kératocône infraclinique est donc un enjeu de santé publique, dont il est important de comprendre les principes.

## Recueil des valeurs des indices topographiques

Les tests de dépistage reposent sur l'utilisation d'indices topographiques, qui prennent chacun des valeurs particulières pour chaque cornée mesurée. On obtient ainsi pour chaque cornée un ensemble de variables quantitatives (ex : valeur du Sim-K, valeur de l'indice (I-S), etc.). On peut synthétiser l'information recueillie pour chaque variable en réalisant une représentation par un diagramme : en abscisse, on range les valeurs numériques qu'ont pu prendre les variables par ordre croissant, et en ordonnées, on lit le nombre de cornées où la valeur correspondante a été mesurée. Si l'on teste un nombre suffisant de cornées, on constate souvent comme en biologie que la distribution des valeurs de l'indice considéré s'agglutine autour d'une valeur moyenne. Autour de cette moyenne, les valeurs décroissent symétriquement. On obtient une courbe « en cloche », et on appelle la loi suivie par la distribution de la variable une loi « normale » (Fig. 11.12).

## Réalisation et mesures des performances des tests de dépistage

Un test diagnostique repose sur deux éléments principaux : recueil d'indices (variables prédictives), et choix d'un seuil.

### Recueil d'un ou plusieurs indices (ou variables, ou critères) auprès de la cornée testée

Ces indices « élémentaires » sont autant de nombres qui correspondent par exemple à la valeur de la kératométrie moyenne centrale, de l'épaisseur du point le plus fin, de la courbure moyenne sur une zone cornéenne donnée, etc. On espère que les valeurs prises par ces indices chez les cornées porteuses de KIC seront différentes de celles observées chez les cornées saines (CS). En général, même si les moyennes entre les groupes peuvent s'avérer significativement différentes, la dispersion autour de ces moyennes est trop importante : les distributions « en cloche » de chacune de ces variables considérées isolément se superposent trop pour que l'on puisse séparer les groupes à partir de leurs valeurs.

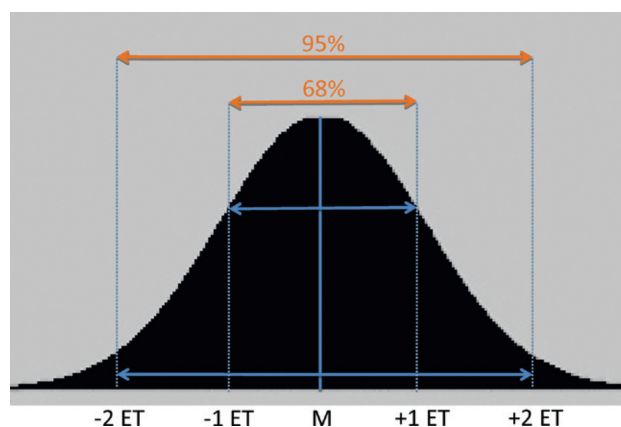



**Fig. 11.12.** Loi normale.
*En abscisse se trouve l'ensemble des valeurs mesurées pour un indice topographique de la valeur la plus faible (à gauche) vers la valeur la plus élevée (à droite). En ordonnée figure le nombre de cornées pour lesquelles on a mesuré une valeur d'indice donné. La hauteur de la courbe est d'autant plus élevée que la valeur de l'indice est courante dans l'échantillon testé. On observe une répartition « en cloche », qui traduit le fait que la distribution de l'indice suit une « loi normale », les valeurs mesurées pour l'indice s'agglutinent autour d'une moyenne. La dispersion peut être quantifiée par le calcul d'une variance ou écart-type. La variance est calculée comme « la somme des carrés des écarts à la moyenne ». L'écart-type est la racine carrée de la variance. Une loi de type « normale » est fréquemment observée quand les valeurs prises par le paramètre étudié dépendent elles-mêmes de nombreux facteurs indépendants. Elle possède des propriétés importantes en statistiques. Elle est centrée sur la moyenne (M), et la dispersion autour de cette moyenne est telle qu'environ 68 % des valeurs mesurées seront comprises entre la moyenne ± 1 écart-type (ET), et que 95 % seront comprises entre la moyenne ± 2 ET. En d'autres termes, la probabilité d'observer une valeur comprise entre -2 ET et +2 ET autour de la moyenne est de 95 %. Seules 2,5 % des valeurs mesurées seront supérieures la moyenne ± 2 ET.*

Toutefois, il semble *a priori* tentant de combiner plusieurs variables pour accroître la capacité de discriminer entre les deux groupes : c'est le principe sous-jacent à l'analyse discriminante.

Le choix des indices « élémentaires » qui vont constituer autant de « variables prédictives » est facilité par le recours à des techniques de régression logistique, en étudiant des groupes de cornées *dont on sait à l'avance qu'elles sont atteintes ou indemnes de KIC*. Par exemple, on peut constituer un groupe d'yeux atteints de kératocône débutant (infraclinique) en sélectionnant l'œil le moins topographiquement atteint chez les patients présentant une forme de kératocône très asymétrique dans son évolution entre un œil et l'autre [1, 2]. On peut utiliser un « test validé » (ex : critères de Rabinowitz) pour sélectionner les yeux qui constitueront les groupes servant à mettre au point le nouveau test. Au passage, signalons que dans le cas où ces yeux moins atteints sont diagnostiqués comme « suspects » pour le kératocône, on sait que la positivité du test désigne un « vrai positif » pour ce diagnostic. En effet, on a la certitude que l'œil déclaré comme suspect est réellement « coupable » d'une forme mineure de kératocône, puisque l'autre œil est atteint par une forme avérée et qu'il n'existe *a priori* pas de forme réellement unilatérale pour cette affection [3]. Si au contraire l'œil le moins atteint n'est pas diagnostiqué comme « suspect », il est un « faux négatif » pour le test validé, mais peut être utilisé pour constituer un groupe d'yeux atteints d'une forme fruste « Placido-négative » [4]. Ce groupe va s'avérer très utile pour chercher à réaliser un test de dépistage plus

sensible, qui utiliserait d'autres critères que la courbure antérieure, et rassemblerait des indices issus des cartes d'épaisseur ou d'élévation.

Une fois les groupes d'yeux constitués, on peut comparer pour chaque indice « élémentaire » les valeurs prises par les cornées de chaque groupe, et choisir à la lumière de tests statistiques ceux qui semblent les plus discriminants (ceux pour lesquels les moyennes et leur dispersion se chevauchent le moins). Les variables prédictives retenues (par exemple : pachymétrie centrale minimale, élévation sur le point le plus fin, etc.) sont ensuite combinées au sein d'une même fonction, selon la technique de l'analyse discriminante linéaire : schématiquement, leurs valeurs sont pondérées par un coefficient calculé de manière automatique, puis additionnées (*cf. infra* « Choix des indices ») On obtient alors pour chaque cornée testée un « score », c'est-à-dire une valeur numérique « abstraite », mais unique et fonction de nombreux indices élémentaires. Cette valeur peut être considérée comme celle d'un nouvel indice, mais qui est cette fois-ci « composite », elle est calculée selon les techniques de fonction discriminante afin de classer au mieux chacune des cornées mesurées dans une catégorie : cornée normale, ou cornée atteinte de kératocône infraclinique. Bien entendu, il faut définir un seuil arbitraire (mais optimal), et décréter que les cornées qui obtiendront un score supérieur/inférieur à ce seuil appartiennent à l'un ou l'autre des groupes (normales, ou atteintes de KIC).

## Choix d'un seuil

La différenciation entre cornées saines et atteintes de KIC repose ainsi sur le choix d'un seuil, qui doit procurer au test un certain niveau d'efficacité, c'est-à-dire de permettre de distinguer les cornées appartenant à chacun des groupes à partir du score calculé pour chacune d'entre elles. Or, pour être efficace (discriminant), un test doit posséder deux qualités : la sensibilité, et la spécificité : le choix de la valeur seuil doit donc conférer à ces deux paramètres des valeurs élevées (idéalement proches de 100 %).

Quand on sait à l'avance à quel groupe appartiennent les yeux mesurés (ce qui est le cas dans notre démarche de réalisation d'un test), on peut représenter la distribution des valeurs de l'indice composite prises par les cornées normales et atteintes de KIC (c'est-à-dire la valeur prise par la fonction discriminante à partir de la combinaison de plusieurs indices topographiques élémentaires). En raison du problème intrinsèque lié à la « ressemblance » entre les cornées saines et les KIC, on obtient un chevauchement entre ces distributions, même s'il est moindre que celui que l'on observerait pour chacune des variables utilisées dans le calcul du score final de la fonction discriminante. En termes simples, certaines cornées saines présenteront des valeurs de score superposables à celles obtenues auprès de certains KIC (et réciproquement !).

Il faut donc choisir un seuil, qui permettra de séparer « au mieux » les cornées. Pour n'importe quel seuil choisi, on peut scinder l'ensemble de toutes cornées testées en quatre groupes : vrais négatifs, faux négatifs, faux positifs et faux négatifs. On conçoit donc aisément que la valeur choisie pour le seuil influe sur la qualité diagnostique du test, par le biais d'une modification de la répartition des cornées dans ces quatre groupes (Fig. 11.13). On devine aussi qu'un bon seuil limite la proportion de cornées classées comme fausses négatives (le nombre de cornées KIC qui « échappent » au test

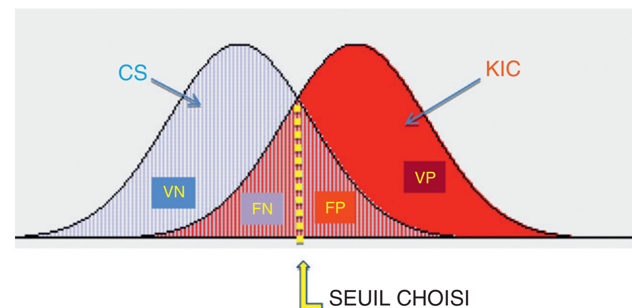



**Fig. 11.13. Distribution des valeurs d'un indice topographique (élémentaire ou composite) mesuré pour un échantillon de cornées dont on sait par ailleurs qu'elles sont saines (en bleu) ou atteintes d'une forme infraclinique de kératocône (en rouge).**
*Il existe un chevauchement important des distributions respectives des valeurs prises par l'indice dans le groupe CS et le groupe KIC. Le choix d'un seuil est délicat pour réaliser un test diagnostique, car il divise les deux groupes en quatre sous-groupes : vrais négatifs, faux négatifs, faux positifs et faux négatifs. En fonction de ces valeurs, on peut calculer la sensibilité et la spécificité du test, pour le seuil choisi.*

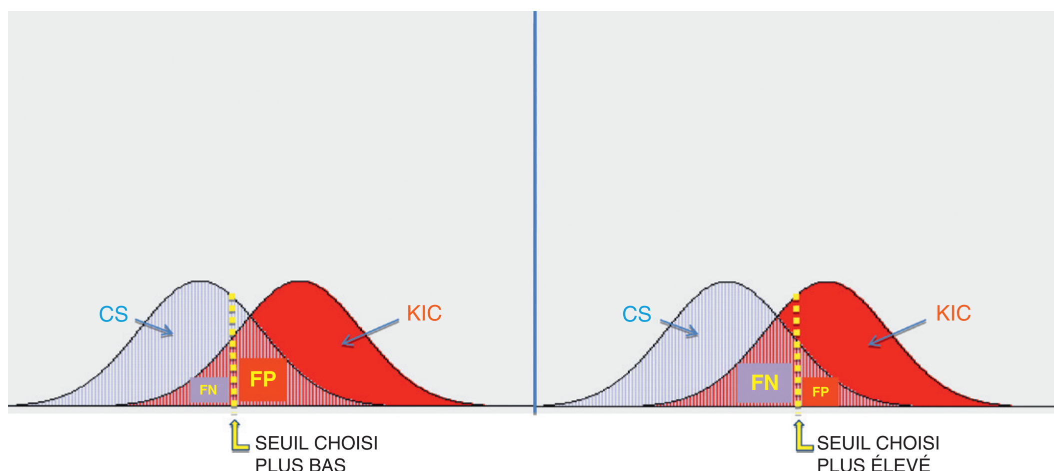



**Fig. 11.14. Influence du choix du seuil pour le test de dépistage : plus le seuil est faible, et plus la proportion de FN diminue, mais plus celle de FP augmente.**
*La sensibilité croît au détriment de la spécificité. Il est possible de calculer la valeur de la sensibilité et de la spécificité pour chaque valeur de seuil, afin de tracer une courbe ROC.*

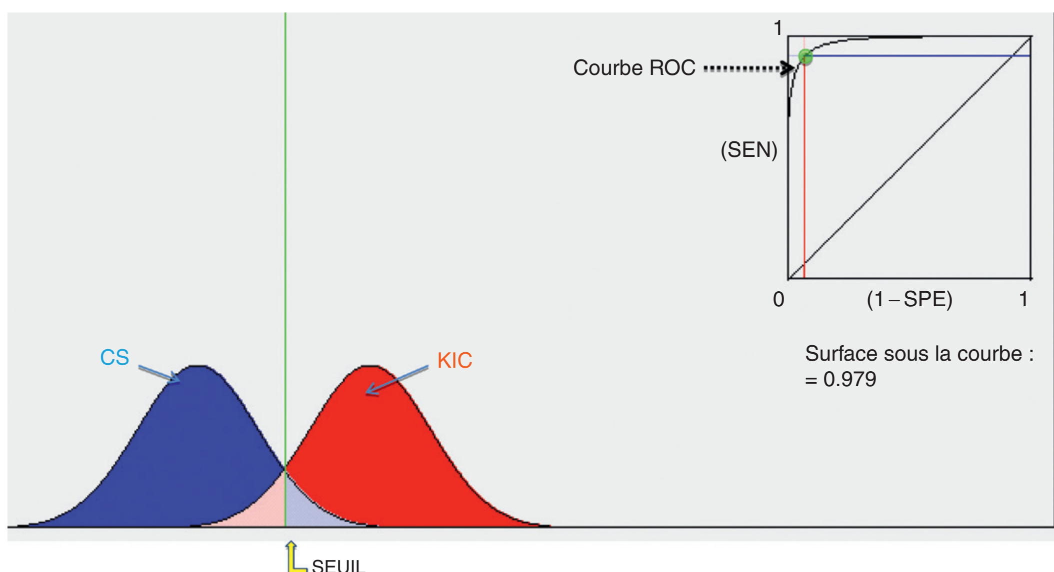
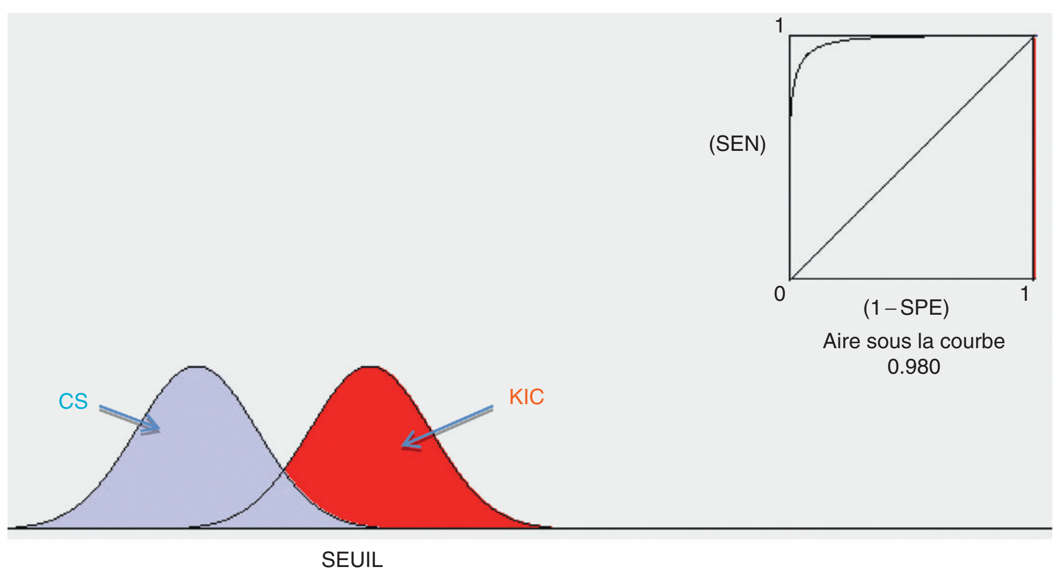
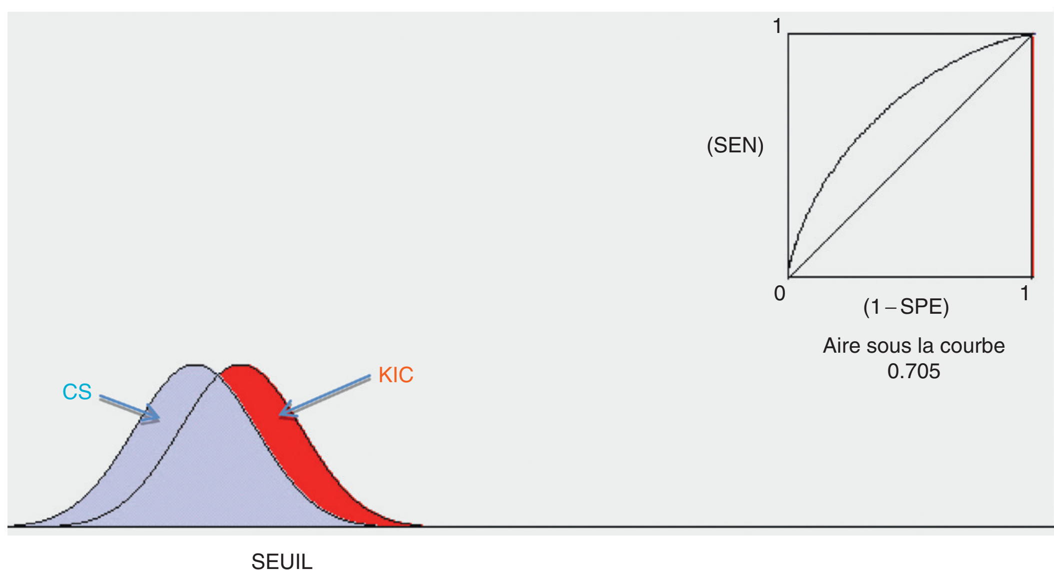



**Fig. 11.15. Après calcul du score pour chacune des cornées testées (en bleu, la distribution des cornées saines, en rouge celle des cornées pathologiques), et pour chaque seuil possible une valeur de sensibilité et de spécificité, tracé de la courbe ROC.**
*Son inspection permet de choisir la valeur du seuil optimal, qui est ici (démarcation : trait vert) celui pour lequel les sensibilité et spécificité sont maximales (le point de la courbe est celui qui est situé le plus près du coin supérieur gauche de la courbe). Si l'on cherche à privilégier la sensibilité, on peut choisir un point un peu plus à gauche sur la courbe, mais ce sera au détriment de la spécificité.*



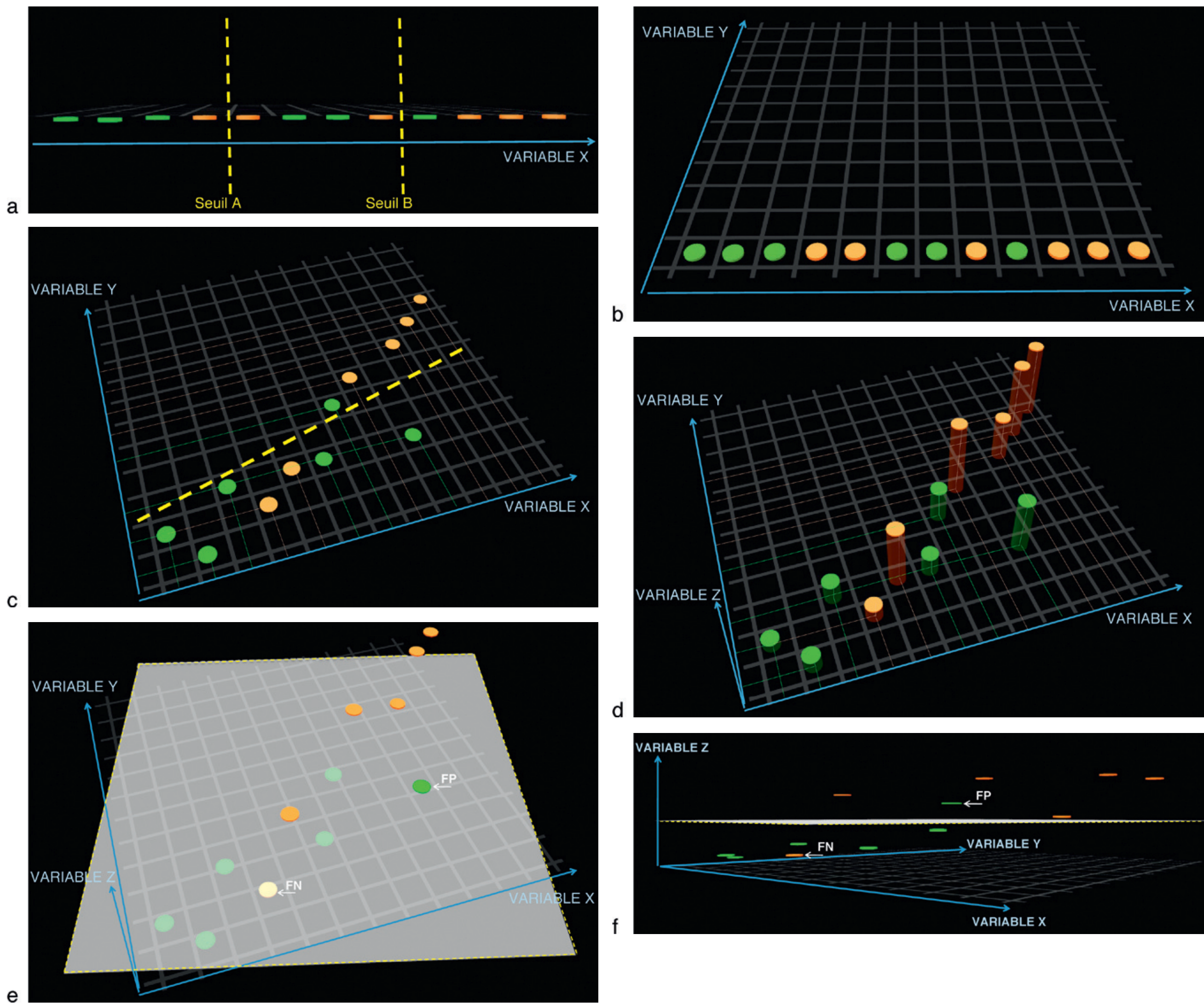



**Fig. 11.17. Réalisation d'un test diagnostique du kératocône infraclinique.**
*a. On dispose de 12 topographies effectuées sur 12 cornées de 12 patients, dont 6 sont déjà connues comme saines (CS), et 6 autres atteintes de KIC. On choisit un indice élémentaire ou variable topographique (VARIABLE X), et on représente la distribution des valeurs prises par cette variable pour les 12 cornées mesurées. Dans cet exemple volontairement simpliste, chaque cornée présente une valeur différente pour la VARIABLE X. Chaque point vert correspond à une cornée saine, chaque point orange correspond à une cornée atteinte de KIC. On observe qu'aucun seuil ne sera à même de conférer au test assez de sensibilité et de spécificité. Le seuil A est sensible, mais peu spécifique, alors que le seuil B est spécifique, mais peu sensible. La sensibilité du test pour le seuil A est de (VP = 5/(VP = 4 + FN = 1)) = 5/6 = 83 %, la spécificité pour le seuil A est (VN = 3/(VN = 3 + FP = 3)) = 3/6 =50 %. b. Pour augmenter la valeur diagnostique du test, on construit un modèle dit de régression logistique, qui va faire intervenir une autre variable : VARIABLE Y : on obtient une valeur pour la VARIABLE Y pour chacune des cornées testées. c. On peut représenter dans un plan chaque cornée comme un point à l'intersection d'un couple de variables (X, Y). Cette représentation permet de définir un nouveau seuil, qui est une droite dans le plan (X, Y). Cette droite, dont l'équation est une combinaison linéaire entre X et Y, représente un nouveau seuil qui permet de mieux séparer les cornées CS (en « dessous ») des cornées KIC (au « dessus ») mais il persiste 1 faux positif, et 2 faux négatifs. Par rapport au test initial avec le seuil fixé à A, on a gagné en spécificité, mais perdu en sensibilité. d. On peut continuer ce type de procédé et faire appel à une troisième VARIABLE Z. Cette fois, les cornées sont représentées par des points dont les coordonnées sont un triplet (VARIABLE X, VARIABLE Y, VARIABLE Z), et sont repérées dans un espace tridimensionnel (X, Y, Z). e. On peut alors définir un nouveau seuil, qui est représenté par le plan grisé. Cette fois-ci, la séparation entre les CS et KIC ne comporte plus qu'un faux positif et un faux négatif (flèches). La sensibilité et la spécificité du test sont accrues par l'utilisation de plusieurs variables (3 dans cet exemple). Cette représentation schématique illustre l'intérêt des indices composites à plusieurs variables. L'indice KISA % comporte 4 variables principales, et rien n'empêche de concevoir des indices constitués de plusieurs dizaines de variables pour accroître la sensibilité et la spécificité du test diagnostique. f. Les éléments de la Fig. 11.17e sont observés dans l'axe du plan de seuil, afin de bien visualiser la séparation des CS (en « dessous » du plan et KIC (au « dessus » du plan). La sensibilité du test pour ce seuil est de (VP = 5/(VP = 4 + FN = 1)) = 5/6 = 83 %, la spécificité est (VN = 5/(VN = 5 + FP = 1)) = 5/6 = 83 %.*

◀ **Fig. 11.16. Comparaison entre deux tests de dépistage, qui n'utilisent pas les mêmes indices élémentaires ni la même fonction discriminante, vis-à-vis de la capacité à discriminer deux types de cornées.**
*Les valeurs obtenues pour chaque cornée testée seront différentes. Le test du haut repose sur une fonction dont les valeurs permettent de mieux discriminer entre les cornées saines de celles atteintes de KIC. L'aire sous la courbe ROC y est nettement supérieure à celle du test dont les distributions de valeurs et la courbe ROC sont représentées en bas.*

doit être le plus faible possible : notion de sensibilité), et fausses positives (la proportion de cornées qui sont diagnostiquées à tort comme KIC doit être la plus faible possible : notion de spécificité).

On peut calculer pour n'importe quel seuil la valeur de ces deux paramètres pour évaluer la qualité diagnostique du test :

– *sensibilité* : capacité à détecter les cornées atteintes de KIC. Le test doit être positif pour chaque KIC testé : ces cornées correspondent à l'ensemble des vrais positifs. Toutefois, il peut arriver que le test renvoie un résultat positif alors que la cornée est saine, c'est-à-dire indemne de KIC : ces cornées constituent l'ensemble des faux positifs. La sensibilité est la proportion de vrais positifs sur le nombre total de cornées réellement atteintes de KIC :

$$\text{Sensibilité} = VP / (VP + FN)$$

– *spécificité* : capacité à identifier correctement les cornées qui sont indemnes de KIC. Ces cornées saines constituent l'ensemble des vrais négatifs. La spécificité est la proportion de vrais négatifs sur le nombre total de cornées réellement indemnes de KIC :

$$\text{Spécificité} = VN / (VN + FP)$$

La Fig. 11.14 montre l'effet de la baisse et de la hausse du seuil. Dans le cas du dépistage du KIC, les erreurs par défaut sont plus graves que les erreurs par excès : on privilégie la sensibilité, car on cherche à réduire le nombre de faux négatifs. On tend alors à baisser le seuil de positivité ; cela augmente la sensibilité, au prix d'une certaine réduction de la spécificité.

Il existe un outil graphique simple mais efficace qui permet de visualiser l'effet du choix d'un seuil sur la sensibilité et la spécificité : la courbe ROC (Receiver Operating Characteristic) soit « caractéristique de fonctionnement du récepteur ». C'est une mesure de la performance d'un outil de classification binaire, c'est-à-dire d'un test qui a pour objectif de catégoriser des entités en deux groupes distincts sur la base d'une ou plusieurs de leurs caractéristiques [5]. Les courbes ROC furent inventées pendant la seconde guerre mondiale pour estimer la séparation entre les signaux radar captés par les stations alliées, et le tracé du bruit de fond. Il était alors important de détecter de vraies attaques, afin de ne pas envoyer une flotte d'avions de reconnaissance ou de combat pour rien…

## Courbe ROC

Graphiquement, on représente la mesure ROC sous la forme d'une courbe qui donne le taux de classifications correctes dans un groupe (taux de vrais positifs) en fonction du nombre de classifications incorrectes (taux de faux positifs) pour ce même groupe.

Dans le cas du dépistage du KIC, on cherche à créer un test pour lequel la sensibilité sera maximale, mais pour lequel on aura un taux faible de faux positifs. Outre la capacité du test discriminant à séparer les KIC et les CS (on a vu qu'il existait un chevauchement inévitable des valeurs prises par le score final), le choix de la valeur seuil du test est donc déterminant.

On peut calculer le nombre de faux positifs, faux négatifs, vrais positifs et vrais négatifs pour n'importe quel seuil (précisons à nouveau que l'on sait depuis le départ si les cornées sont saines ou atteintes de KIC). On peut alors calculer la sensibilité et la spécificité du test pour chaque valeur de seuil possible. Ces valeurs sont logiquement comprises entre la plus faible valeur obtenue par la fonction discriminante (si on la choisissait comme seuil, le test serait 100 % sensible mais 0 % spécifique), et la plus élevée de ces valeurs. On obtient au final pour chaque seuil un couple de valeur (Sensibilité/Spécificité).

L'obtention de ces couples de valeurs pour chaque seuil permet de tracer une courbe ROC. En ordonnées, l'axe représente la valeur de la sensibilité, et en abscisse le pourcentage de faux positifs parmi les cornées KIC : VP/(VN + FP), soit (1 – Spécificité).

On obtient ainsi un graphe convexe vers le haut et la gauche (Fig. 11.15). Plus la courbe est convexe et proche du coin supérieur gauche, plus le test est potentiellement discriminant. La surface sur la courbe ROC est donc un indicateur de la qualité du test. Le seuil optimum à choisir pour le test se situe au plus près du coin supérieur gauche ; c'est celui pour lequel la sensibilité et la spécificité sont maximums.

Le tracé de courbes ROC permet de comparer différents tests diagnostiques. Plus l'aire sous la courbe est élevée (proche de 1), meilleur est le test *a priori* (Fig. 11.16). Si l'aire sous la courbe ROC reflète la qualité d'un test diagnostique, celle-ci dépend du choix des variables qui y sont utilisées. Il convient donc de choisir des variables les plus contributives, c'est-à-dire qui vont permettre de séparer au mieux les cornées des groupes sains de celles présentant un KIC. La Fig. 11.17 est une représentation graphique des méthodes utilisées en statistiques d'analyse discriminante, qui vise à considérer un certain nombre de variables prédictives pour distinguer un groupe de sujets malades par rapport à des sujets sains. L'indice KISA % comporte quatre variables prédictives, ce qui permet à sa sensibilité et sa spécificité de surpasser celles obtenues à partir de tests diagnostiques qui n'utiliseraient qu'une ou deux de ces variables (ex : (I-S) seul, ou SRAX seul, etc.). Nous avons construit un modèle statistique pour la détection des kératocônes infracliniques (forme fruste) qui comporte plus d'une trentaine de variables, afin d'obtenir une sensibilité égale à 92,5 %, une spécificité égale à 92 %, et une aire sous la courbe ROC égale à 0,98 [6]. Ce résultat démontre que l'utilisation de données issues de l'élévation et de l'épaisseur cornéenne accroît la sensibilité et la spécificité du kératocône fruste.

**Références**


[1] Buhren J, Kuhne C, Kohnen T. [Wavefront analysis for the diagnosis of subclinical keratoconus]. Ophthalmologe 2006 ; 103 (9) : 783–90.

[2] Buhren J, Kuhne C, Kohnen T. Defining subclinical keratoconus using corneal first-surface higher-order aberrations. Am J Ophthalmol 2007 ; 143 (3) : 381–9.

[3] Mahon L, Kent D. Can true monocular keratoconus occur ? Clin Exp Optom 2004 ; 87 (2) : 126 author reply.

[4] Saad A, Gatinel D. Topography and Tomography Properties of Forme Fruste Keratoconus Corneas. Invest Ophthalmol Vis Sci 2010 ; June 16.

[5] Zou KH, O'Malley AJ, Mauri L. Receiver-operating characteristic analysis for evaluating diagnostic tests and predictive models. Circulation 2007 ; 115 (5) : 654–7.

[6] Saad A, Gatinel D. Topographic and tomographic properties of forme fruste keratoconus corneas. Invest Ophthalmol Vis Sci 2010 ; 51 (11) : 5546–55.

# Index